



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO

MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

PLATAFORMA ELECTRÓNICA INALÁMBRICA TIPO “WEARABLE” Y ENSAYOS DE ESTA CON POBLACIÓN PARA VALIDACIÓN DE COMUNICACIÓN HÁPTICA ENTRE MÁQUINA-PERSONA

JULIO DE 2015

ALUMNO: RICARDO GONZÁLEZ TORAL

TUTOR: JUAN CARLOS ÁLVAREZ ÁLVAREZ
TUTOR: LUIS ÁLVAREZ-HEVIA IGLESIAS

RESUMEN

El trabajo realizado está basado en la propuesta remitida por Luis Álvarez-Hevia Iglesias al departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Oviedo.

En este proyecto se intentará comprobar, a través de experimentación con un prototipo, la viabilidad de un dispositivo háptico que, empleando actuadores vibrotáctiles, transmita información de manera fiable al usuario del mismo.

Para ello, se realizarán pruebas destinadas a determinar el tamaño de la matriz de actuadores a implementar y las posiciones relativas de estos a fin de conseguir sensaciones de trazos o patrones estáticos a partir de su vibración en función del tipo de información que se desee transmitir.

Una vez realizadas estas pruebas, se procederá al diseño y fabricación de un prototipo (denominado *SimTac*) destinado a comprobar la eficiencia de estas funcionalidades realizando experimentos con un grupo de pruebas variado.

A partir de los resultados obtenidos de estas pruebas, se tratará de dar una evaluación al prototipo cara a una producción seriada del mismo, haciendo hincapié en las aplicaciones para las que se considera apto.

PALABRAS CLAVE

Prototipo *SimTac*: Dispositivo háptico destinado a la transmisión de información por medio del tacto a través de una matriz de actuadores que reproduzca trazos definidos por el operario del mismo.

Percepción háptica: Combinación de sensibilidad cutánea y kinestésica que permite conocer el entorno en que se halla inmerso el cuerpo humano. Los dispositivos hápticos hacen uso de esta característica para transmitir información a través del tacto.

Dispositivo *wearable*: Dispositivos que se encuentran embebidos en la ropa o se sitúan sobre esta o bajo esta. Pueden tener un propósito estético o incorporar funcionalidades útiles para los usuarios.

Arduino Mega 2560: Tarjeta basada en el microcontrolador ATmega2560 con un gran número de entradas/salidas digitales, capacidad para generar señales PWM, entradas analógicas, entradas de puerto serie y conexión USB.

Matlab: Entorno de programación basado en cálculos matriciales desarrollado a partir del lenguaje C++. Permite, entre otras funcionalidades, llevar a cabo cálculos matriciales, ejecutar ficheros en lenguaje M y desarrollar interfaces de usuario.

Simulink: Entorno de programación visual que funciona sobre el entorno Matlab. Permite llevar a cabo simulaciones de los modelos desarrollados para el mismo, además de disponer de un añadido con el que traducir estos a código que pueda ser volcado sobre una placa Arduino Mega 2560.

ÍNDICE GENERAL

1. FIJACIÓN DE OBJETIVOS	1
1.1. Estudio de antecedentes	1
1.2. Diseño conceptual	1
1.3. Diseño del prototipo	1
1.4. Diseño del software de control	2
1.5. Pruebas del prototipo	2
1.6. Exigencias y deseos	2
2. ESTUDIO DE LOS ANTECEDENTES	3
2.1. Mecanorreceptores cutáneos	3
2.1.1. <i>Corpúsculos de Meissner</i>	4
2.1.2. <i>Celdas de Merkel</i>	4
2.1.3. <i>Terminaciones de Ruffini</i>	5
2.1.4. <i>Corpúsculos de Pacini</i>	6
2.2. Dispositivos hápticos	6
2.2.1. <i>Estimulación electrocutánea/electrotáctil</i>	7
2.2.2. <i>Estimulación electromecánica/vibrotáctil</i>	7
2.2.3. <i>Estimulación neumática</i>	8
2.2.4. <i>Sensaciones cutáneas</i>	8
3. EXPERIMENTACIÓN PREVIA	10
4. DISEÑO DEL PROTOTIPO	16
4.1. Diseño mecánico	16
4.2. Diseño electrónico	21
4.2.4. <i>Arduino Mega 2560</i>	21
4.2.2. <i>Placas electrónicas de diseño propio</i>	22
4.3. Diseño de software	24
4.3.1. <i>Modo Configuración</i>	27
4.3.2. <i>Modo Independientes</i>	28
4.3.3. <i>Modo braille</i>	30
4.3.4. <i>Modo trazos</i>	32
4.3.5. <i>Adaptabilidad del software</i>	34
5. EXPERIMENTACIÓN CON EL PROTOTIPO	35
5.1. Protocolo de pruebas	35
5.2. Estudio de los resultados	37
5.3. Rediseño del prototipo	40
6. CONCLUSIONES	42
7. PRESUPUESTO	43
7.1. Coste de materiales	43
7.2. Coste de amortización del equipo	45
7.3. Coste de la mano de obra	46
7.4. Presupuesto total del proyecto	48
8. BIBLIOGRAFÍA	49
8.1. Libros	49

8.2. Artículos	49
8.3. Páginas web.....	50
8.3.1. <i>Hardware</i>	50
8.3.2. <i>Software</i>	50

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Corpúsculo de Meissner.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.2. Celda de Merkel.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.3. Terminaciones de Ruffini</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2.4. Corpúsculo de Pacini.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.5. Motores vibradores</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.6. Pines bimórficos.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3.1. Realización de una prueba.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3.2. Dispositivo diseñado para las pruebas</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.3. Panel de respuesta</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.4. Fragmento de un formulario de pruebas cumplimentado.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.5. Matriz de actuadores.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4.1. Proceso de recortado de material.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4.2. Superficie interior del dispositivo</i>	<i>17</i>
<i>Figura 4.3. Superficie exterior del dispositivo.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4.4. Soporte para placas</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4.5. Placa montada sobre el soporte.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4.6. Arduino sujeto al brazalete</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4.7. Brazalete completo.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4.8. Arduino Mega 2560.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 4.9. Circuito de control de cada hilera de motores (A, B, C, D o E).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4.10. Diseño de la PCB a utilizar</i>	<i>22</i>
<i>Figura 4.11. Placa electrónica completa.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4.12. Conexión de Arduino con el resto de elementos</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4.13. Interfaz de configuración</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4.14. Diagrama de estados de los modelos.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4.15. Selección de la forma de onda en el modelo.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4.16. Generación de una señal PWM a partir de una onda senoidal</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4.17. Selección de la forma de onda en el interfaz</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4.18. Activación de los motores individuales en el modelo.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4.19. Interfaz del modo Independientes</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.20. Bloque de control de salida a motores del modo Braille</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4.21. Interfaz del modo Braille</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4.22. Bloque de salida a motor en el modo Trazos</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.23. Bloque de control de tiempo de activación del motor en el modo Trazos</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.24. Interfaz del modo Trazos.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.25. Trazos predefinidos.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 5.1. Formulario de pruebas cumplimentado para Trazos.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 5.2. Rediseño de algunos de los trazos.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5.3. Formulario de pruebas cumplimentado para Braille</i>	<i>39</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1. Exigencias y deseos para el prototipo SimTac</i>	<i>2</i>
<i>Tabla 3.1. Señales PWM aplicadas a los motores</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 7.1. Coste de materiales textiles</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 7.2. Coste de materiales eléctricos</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 7.3. Coste de amortización del equipo.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 7.4. Coste de mano de obra para pruebas y organización</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 7.5. Coste de mano de obra para diseño y fabricación</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 7.6. Presupuesto total del proyecto.....</i>	<i>48</i>

1. **FIJACIÓN DE OBJETIVOS**

El objetivo del presente proyecto es el diseño e implementación de un prototipo para el dispositivo háptico *SimTac*, propuesto por Luis Álvarez-Hevia. Este prototipo deberá excitar los mecanorreceptores cutáneos empleando una matriz de actuadores físicos o microcorrientes para transmitir información en forma de patrones al usuario del mismo. Además, deberá tratarse de un dispositivo *wearable* que permita un uso cómodo y sencillo por parte de usuarios no familiarizados con él.

1.1. **Estudio de antecedentes**

Previo al diseño del prototipo, será necesario llevar a cabo un estudio sobre los mecanismos que emplea el cuerpo humano para obtener información de su entorno a través del tacto. Para ello, no solo se estudiarán los mecanorreceptores cutáneos (receptores sensoriales que detectan excitaciones mecánicas sobre el cuerpo), sino también los mecanismos que emplean estos para transmitir información al cerebro (en forma de potenciales de acción) para determinar el modo correcto de excitarlos.

Además, se realizará una investigación sobre el estado de desarrollo actual de los dispositivos hápticos, concretamente aquellos destinados a reproducir trazos sobre la piel de los individuos, para establecer una base de la que partir para diseñar el prototipo.

1.2. **Diseño conceptual**

El *SimTac* podrá estar situado sobre cualquier parte del cuerpo, aunque se dará preferencia al antebrazo en la medida de lo posible, teniendo como único requerimiento que sea capaz de adaptarse a distintos usuarios sin necesidad de muchos ajustes y que cumpla su función de transmisión de patrones correctamente. Por ello, en primera instancia se estudiarán las posibles ubicaciones de este atendiendo al tamaño que requeriría el prototipo, a la sensibilidad cutánea en esa zona y al tamaño que permite para la matriz de actuadores, ya que con una mayor densidad de estos se conseguirá una precisión más alta a la hora de representar los patrones deseados.

Posteriormente se procederá a un estudio de los posibles actuadores a emplear, dando preferencia si esto es posible a los actuadores vibradores, por motivos de disponibilidad de material, y a los basados en microcorrientes, por ser este un campo no demasiado desarrollado y prometedor en cuanto al tamaño de la matriz. Tanto en el paso previo como en este se requerirá la colaboración de sujetos de pruebas para reunir datos que permitan tomar las decisiones más acertadas.

1.3. **Diseño del prototipo**

Una vez seleccionadas la ubicación y la forma de actuación del dispositivo, se diseñará y construirá este teniendo en cuenta la necesidad de continuos ajustes hasta obtener el modelo deseado y las limitaciones propias de un prototipo, poniendo énfasis en el

presupuesto necesario para construirlo y en la eliminación de parámetros innecesarios para un producto no comercial, como el atractivo estético. Una vez logrado el funcionamiento del mismo, tratarán de introducirse aspectos propios de dispositivos *wearable* como la comunicación por *wifi* o *bluetooth* y la alimentación por baterías portátiles.

1.4. Diseño del software de control

Durante este paso se diseñará también un software que permita controlar los actuadores, bien individualmente, bien para generar los trazos deseados, en una primera versión de manera preprogramada (es decir, con trazos previamente definidos por el programador) y, si es posible, en una segunda versión elaborándose estos en tiempo real (a través de indicaciones por pantalla táctil por parte del usuario). Este software será volcado sobre algún dispositivo embebido que permita realizar las tareas de control de los actuadores desde el propio prototipo.

1.5. Pruebas del prototipo

Finalmente, con el prototipo ya construido, se procederá a reunir un grupo de pruebas que permita comprobar el correcto funcionamiento del mismo, tratando de incluir personas de diferentes edades y sexos para definir mejor la influencia de estos factores. Durante esta fase se llevará a cabo un rediseño del prototipo, incidiendo en los aspectos en los que se hayan detectado más complicaciones.

1.6. Exigencias y deseos

En lo concerniente al prototipo final, se ha elaborado una lista de exigencias y deseos que deberá cumplir una vez construido.

Tabla 1.1. Exigencias y deseos para el prototipo SimTac

Exigencia/Deseo	Descripción
Exigencia	Capacidad para reproducir trazos sobre la piel del usuario
Exigencia	Capacidad para reproducir patrones estáticos sobre la piel del usuario
Exigencia	Matriz de actuadores de tamaño mínimo 2x3
Deseo	Capacidad para excitar los actuadores con distintas formas de onda
Deseo	Comunicación inalámbrica con el PC
Deseo	Fuente de alimentación incorporada
Deseo	Definición de trazos a través de un dispositivo táctil
Deseo	Reproducción de formas 3D a través de trazos
Deseo	Capacidad para operar sobre distintas zonas del cuerpo
Deseo	Empleo de microcorrientes como actuadores

2. **ESTUDIO DE LOS ANTECEDENTES**

Antes de abordar el diseño del prototipo *SimTac*, es conveniente recabar información pertinente al estado de desarrollo en que se encuentran actualmente otros dispositivos hápticos de comportamiento similar, además de investigar acerca de los mecanismos empleados por la piel para la percepción de estímulos externos.

2.1. **Mecanorreceptores cutáneos**

La sensibilidad somática, que permite adquirir información acerca de su propio cuerpo a los seres vivos, está compuesta por cuatro tipos de sensaciones diferenciados: El toque discriminativo (que permite reconocer el tamaño, la forma y la textura de los objetos y su movimiento en la piel), la propiocepción (la posición estática y el movimiento de miembros), la nocicepción (que indica daños o irritación química de tejidos y es percibida como dolor o picor) y la temperatura (que distingue las sensaciones de frío y calor).

Se pueden distinguir dos clases de sensaciones somáticas: Las protopáticas (sensaciones de dolor, temperatura, picor y cosquilleo, que son detectadas por receptores cutáneos no encapsulados) y las epicríticas. Estas últimas están relacionadas con aspectos suaves del tacto y permiten la topognosis (detectar contactos suaves con la piel y localizar su posición), distinguir vibraciones y determinar su frecuencia y amplitud, detectar mediante el tacto detalles como la textura de superficies o la separación de dos puntos tocados simultáneamente y reconocer la forma de objetos sujetos en la mano (estereognosis). Las sensaciones epicríticas son detectadas por receptores cutáneos encapsulados, como los mecanorreceptores.

El término mecanorreceptor se refiere a un tipo de receptor sensorial que reacciona a la aplicación de presión o distorsiones. En la piel glabra (sin pelo) humana hay cuatro tipos que resultan de interés para este proyecto: Los corpúsculos de Meissner, las celdas de Merkel, las terminaciones de Ruffini y los corpúsculos de Pacini. Cada uno de estos reacciona a diferentes frecuencias de vibración o a distintos estímulos, pero todos ellos tienen en común el hecho de disparar potenciales de acción, una onda de descarga eléctrica que modifica la distribución de la carga y que empleada para transmitir información en diversos procesos biológicos. Para todos ellos es importante conocer su campo receptivo (el área dentro de la cual un estímulo excita una célula), ya que dos estímulos distintos solo serán diferenciables si se encuentran en campos receptivos diferentes.

2.1.1. Corpúsculos de Meissner



Figura 2.1. Corpúsculo de Meissner

Se trata de un receptor situado en la superficie de la dermis cuyo campo receptivo es pequeño (de apenas unos milímetros de diámetro). Están destinados a la recepción de las sensaciones de tacto ligero y vibraciones y presentan una mayor sensibilidad para excitaciones de entre 20 y 50 Hz de frecuencia. Son de adaptación rápida, es decir, al detectar un estímulo generan un potencial que decrece rápidamente y termina cesando, mientras que al eliminar el estímulo generan otro potencial. Este fenómeno se debe a que precisan la deformación del corpúsculo para generar los potenciales de acción, por lo que no son receptores aptos para detectar presión sobre la piel pero sí para detectar cambios en la textura de los objetos.

Existe una variación anatómica de estos corpúsculos, los de Krause, que se encuentran profundos en la hipodermis y registran la sensación de frío debido a temperaturas bajas.

2.1.2. Celdas de Merkel

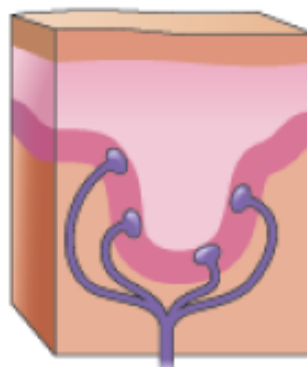


Figura 2.2. Celda de Merkel

Al igual que en el caso de los corpúsculos de Meissner, el campo receptivo de estas celdas es de unos milímetros de diámetro. Sin embargo, estos receptores se encuentran

en el límite de la epidermis y están destinados a detectar la presión, los patrones y la textura de los objetos, siendo más sensibles a vibraciones de baja frecuencia, de entre 5 y 15 Hz. Son de adaptación lenta, por lo que presentan una respuesta sostenida a la desviación mecánica, aunque esta es más potente al principio del estímulo (fase dinámica). Estos receptores continúan disparando durante la fase estática (que puede durar más de 30 minutos) a intervalos irregulares. Presentan un disparo más rápido cuando pequeños puntos perforan la piel y más lento en curvas lentas o superficies planas, siendo muy sensibles a los desplazamientos (llegan a responder a desplazamientos de menos de 1 μm).

2.1.3. Terminaciones de Ruffini

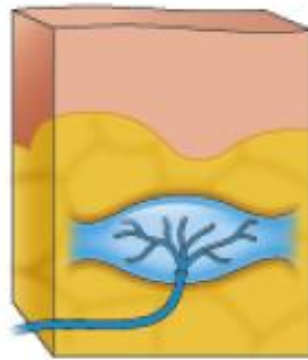


Figura 2.3. Terminaciones de Ruffini

Estas terminaciones, que se encuentran profundos en la dermis, también son de adaptación lenta, aunque en este caso presentan un campo receptivo grande (pueden abarcar todo un dedo, la mitad de la palma de la mano...). Perciben cambios en la temperatura relacionados con la sensación de calor (aunque a partir de cierta temperatura disparan un potencial de acción similar al generado por la sensación de frío de los corpúsculos de Krause) y registran estiramientos de la piel, ya que identifican la deformación continua de esta.

2.1.4. Corpúsculos de Pacini



Figura 2.4. Corpúsculo de Pacini

Estos receptores, situados en la dermis entre los de Ruffini y los de Meissner, son de adaptación rápida y responden a vibraciones y presión mecánica. Estas vibraciones son de frecuencias muy elevadas (entre 60 y 400 Hz, siendo el rango óptimo para humanos 200-250 Hz, en el cual se detectan vibraciones de 1 μm de amplitud). Son especialmente numerosos en manos y pies y también se emplean para enviar información sobre el movimiento de las articulaciones. Al igual que las terminaciones de Ruffini, tienen campos receptivos grandes.

2.2. Dispositivos hápticos

En los últimos años los dispositivos hápticos han experimentado un gran desarrollo debido al gran interés que despiertan. Entre sus posibles aplicaciones, las más habituales son proporcionar la ilusión de contacto sobre la piel, mejorar la percepción de la situación, compensar las faltas de la tecnología actual y aumentar el realismo de las simulaciones. Todos estos usos están basados en el conocimiento de que la combinación de estimulación táctil y visual o auditiva mejora la percepción general, ya que estimula la actividad cerebral. Por ello, para este tipo de dispositivos es muy importante seleccionar adecuadamente la zona del cuerpo sobre la que van a trabajar, ya que la percepción sensorial varía en el cuerpo, siendo las zonas más habituales el antebrazo, las manos, el torso y la espalda, aunque en la actualidad se emplean estímulos que afectan a partes del cuerpo distintas en función de la actividad que se está desarrollando o del nivel de sensibilidad o tamaño de la estimulación que se requieren (por ejemplo, sillines de bicicleta que estimulan los glúteos, sistemas de reconocimiento de patrones destinados a las yemas de los dedos o sistemas basados en cambios simples de patrones de larga duración para los muslos).

El torso no es de las zonas más receptivas del cuerpo, pero no suele estar implicado en ninguna actividad, por lo que resulta adecuada su estimulación durante multitareas, como puede ser el caso de los dispositivos hápticos desarrollados como accesorio para los videojuegos. La espalda, por su parte, es menos sensible que el torso en cuanto a que resulta más difícil identificar el origen de la estimulación, y su sensibilidad decrece conforme este se aleja del plano sagital (que separa ambas partes del cuerpo), por lo que

su uso suele estar reservado a sensaciones que se desplazan de manera continua por ella y no a estímulos en puntos concretos. Los antebrazos y las manos son empleados sobre todo para transmitir información, ya sea de forma estática (como actuadores funcionando de forma independiente) o dinámica (como actuadores coordinados para generar sensaciones móviles), ya que la gran cantidad de mecanorreceptores presentes en ellos facilita mucho la tarea.

En cuanto al tipo de actuadores a emplear, estos pueden ser clasificados principalmente en tres tipos en función del tipo de estimulación que generan: Electrocutáneos y electrotáctiles, electromecánicos y vibrotáctiles o neumáticos.

2.2.1. Estimulación electrocutánea/electrotáctil

Esta estimulación es del tipo eléctrico aplicada sobre la piel, utilizando intensidades de corriente de entre 0,17 y 2,9 mA y potencias de entre 290 μ W y 80 mW. Con estos actuadores es muy fácil provocar sensaciones desagradables, ya que el umbral de percepción está muy próximo al de dolor. En función de la localización del electrodo y la naturaleza del contacto de este con la piel se registra mucha variación en el efecto de un estímulo. Estos actuadores requieren poca energía para funcionar.

Para este tipo de estimulación hay que tener en cuenta que corrientes elevadas (en torno a 15 mA) pueden producir efectos adversos como parálisis respiratoria, fatiga, dolor, fibrilación ventricular, contracción duradera miocárdica, quemaduras o daños en los tejidos. Para corrientes de entre 2 y 10 mA de intensidad se percibe cosquilleo y un ligero calentamiento de la piel.

2.2.2. Estimulación electromecánica/vibrotáctil

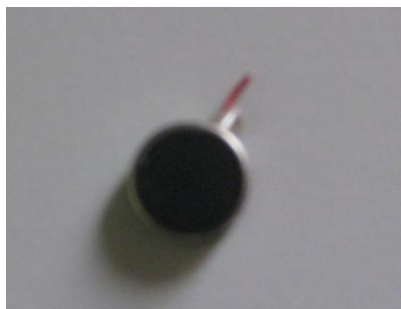


Figura 2.5. Motores vibradores

Dentro de esta categoría se distinguen dos tipos básicos de dispositivos: Pines y estimuladores grandes. Los dispositivos basados en pines piezoeléctricos bimórficos consumen poca energía, se acumulan fácilmente, son fáciles de usar, producen una sensación no dolorosa y producen una buena discriminación entre dos puntos. Sin embargo, requieren un espacio considerable debido a la naturaleza de su funcionamiento. Los dispositivos con un gran punto de contacto son actuadores vibradores simples presionados contra la piel. Tienen una peor resolución que los pines,

pero son más potentes que estos. Su accionamiento puede ser eléctrico o neumático, siendo estos últimos más potentes y menos peligrosos. Suelen estimular la piel a frecuencias entre 10 y 500 Hz y para percibir desplazamientos a frecuencias medias necesitan aproximadamente potencias de $0,1 \mu\text{W}$ aplicados en una superficie de $0,6 \text{ cm}^2$ en la yema del dedo.

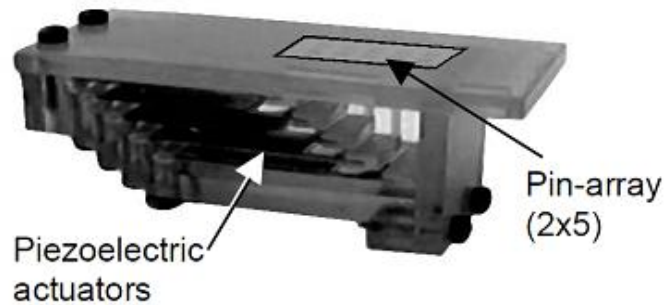


Figura 2.6. Pines bimórficos

2.2.3. Estimulación neumática

En este caso se trata de vejigas que se inflan y desinflan rápidamente. Son más fáciles de localizar que los estímulos vibrotáctiles debido a que estimulan mecanorreceptores de adaptación lenta situados en las capas externas de la piel, pero pueden tener fugas de aire, su eficiencia se ve influida por la compresibilidad del aire y el rango de frecuencias al que pueden trabajar es limitado. Además, son actuadores más grandes y difíciles de controlar.

2.2.4. Sensaciones cutáneas

Para todos estos tipos de actuadores, es importante tener en cuenta la forma de excitación del mismo (por ejemplo, se puede distinguir la excitación de un actuador vibrador con una onda cuadrada de la excitación del mismo con una onda senoidal). Un estímulo cuya duración sea menor a 0,1 segundos se percibe como discreto, mientras que los de mayor duración se perciben como continuos.

Uno de los fenómenos más fácilmente explotable de los producidos por los mecanorreceptores cutáneos es el de movimiento aparente de los actuadores. Este tiene lugar cuando dos estímulos vibratorios independientes que se encuentran cercanos entre sí actúan sobre la piel de forma que sus tiempos de actuación presentan un tiempo de solapamiento intermedio. En este caso, no se perciben dos actuadores sino uno desplazándose entre las posiciones que ocupan estos. Para producir correctamente este efecto, se deben tener en cuenta tanto la duración del estímulo como el tiempo de solapamiento, ya que ambos condicionan la velocidad a la que se percibe el desplazamiento.

También se debe tener en cuenta el fenómeno del actuador fantasma, producido por la actuación simultánea de dos actuadores vibradores cercanos entre sí, que crea la ilusión de un único actuador situado entre ellos. A diferencia del caso anterior, esta ilusión es estática y no se percibe movimiento. La posición de este actuador fantasma depende de las intensidades relativas de los actuadores físicos, de manera que si ambas son iguales aparecerá en el punto intermedio entre ambos. La intensidad de este, así mismo, depende de las intensidades de los actuadores reales.

3. **EXPERIMENTACIÓN PREVIA**

Para conseguir un diseño del prototipo que permita llevar a cabo las acciones deseadas, se deben determinar tanto la localización del mismo como el número de actuadores que es posible implementar, así como la posición relativa entre ellos.

En primer lugar, tras considerar todas las alternativas de actuadores, se seleccionaron los motores vibradores para las pruebas. Las microcorrientes fueron descartadas por el tamaño necesario para el electrodo de contacto con la piel y por las medidas de seguridad que requieren, ya que el umbral de dolor está muy próximo al de percepción. Entre los actuadores físicos, se seleccionaron los motores por motivos de disponibilidad de material, tamaño del actuador y capacidad de adaptarse a su colocación en prácticamente cualquier parte del cuerpo humano.

Durante las pruebas, estos motores se controlaron utilizando un microcontrolador PIC16F887, por ser el modelo del que se dispone en el laboratorio y por familiaridad con él a la hora de programarlo. Para lograr controlar los motores con este, fue necesario alimentarlos a través de transistores, por lo que se empleó un protoboard para realizar todo el conexionado.

En cuanto a la situación de los actuadores en el cuerpo, se llevaron a cabo pruebas de percepción situando los motores en distintas zonas de la espalda, el abdomen y el antebrazo, por ser las zonas más adecuadas para este tipo de dispositivos. En el caso de la espalda y el abdomen, se observó que, además de presentar dificultades para construir un dispositivo wearable que se adaptase a todos los individuos, la percepción de vibraciones variaba demasiado entre sujetos como para poder obtener datos fiables que permitiesen diseñar un único prototipo. Por ello, dado que el antebrazo varía menos de tamaño entre individuos de un mismo sexo (siendo el de un hombre medio 4 cm más largo que el de una mujer media) y la percepción en el mismo es similar en la mayoría de individuos, se decidió elaborar un brazalete como prototipo.

Para comprobar la efectividad de los motores actuando sobre la piel para transmitir información de manera “estática” (es decir, reproduciendo continuamente el mismo patrón con su vibración) se construyó un dispositivo que consta de 6 motores que irán situados en forma de matriz 2x3 sobre el antebrazo izquierdo. Se ha escogido esta distribución porque estudios previos indican que es posible reconocer patrones de Braille a través de actuadores sobre la piel, por lo que se asume que esta cantidad de información puede ser correctamente procesada.

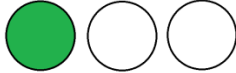


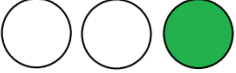
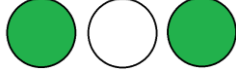




Figura 3.1. Realización de una prueba

El dispositivo construido permite seleccionar manualmente (a través de dos pulsadores) una entre 7 frecuencias distintas de señal PWM para excitar los motores, lo que hace posible realizar pruebas con el tipo de vibración que mejor detecte el sujeto. Esto es interesante debido a las frecuencias de excitación propias de los receptores subcutáneos que detectan las vibraciones sobre la piel, que varían entre distintos individuos. Además, los tres principales receptores de frecuencias son excitados de forma óptima a 5-15 Hz (celdas de Merkel) o 250 Hz (corpúsculos de Pacini y Meissner, que necesitan amplitudes de vibración mucho menores).

Debido a las características de los motores empleados, es complicado conocer su frecuencia de vibración, por lo que se optó por implementar 4 posibles señales PWM que hacen vibrar el motor de forma continua al máximo de su velocidad, pero actuando con una frecuencia fijada por la señal (es decir, vibración máxima durante medio segundo, parada durante medio segundo, por ejemplo). Además se implementaron tres posibles señales PWM en las que la vibración del motor se realiza de forma continua y lo que se varía es la intensidad del mismo.

Tabla 3.1. Señales PWM aplicadas a los motores

	Ráfagas de medio segundo a máxima velocidad
	Ráfagas de un cuarto de segundo a máxima velocidad
	Ráfagas de un octavo de segundo a máxima velocidad
	Ráfagas de un dieciseisavo de segundo a máxima velocidad
	Vibración constante a intensidad alta
	Vibración constante a intensidad media
	Vibración constante a intensidad baja

La otra característica del dispositivo de pruebas es que permite alimentar cada motor por separado a través de pulsadores, por lo que es fácil reproducir el patrón deseado por el operario de este. Además, se puede experimentar con el fenómeno del actuador fantasma coordinando correctamente los motores. Debido a que en este dispositivo la posición de los motores no es fija, se tomaron datos acerca de la posición relativa entre ellos para almacenar datos acerca de la colocación óptima de estos de cara a la construcción del prototipo final. Durante las pruebas, en algunos sujetos seleccionados aleatoriamente se trató de conseguir el fenómeno del actuador fantasma y en otros vibraciones distinguibles, ambas cosas a través de distintas colocaciones para los motores.

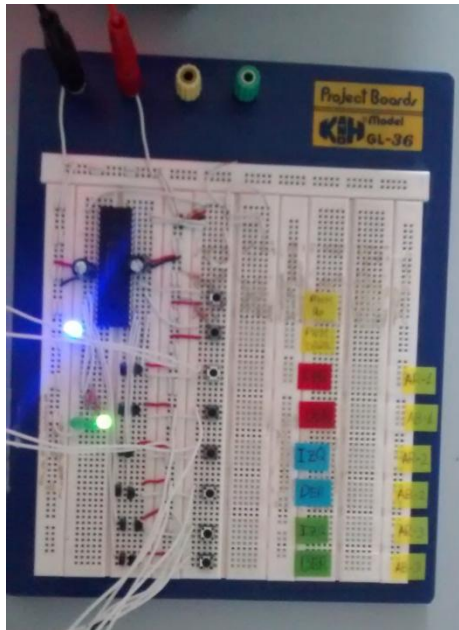


Figura 3.2. Dispositivo diseñado para las pruebas

Durante las pruebas se taparon los ojos y se reprodujeron ruidos rosas en los oídos del participante para aislarlo de otros posibles canales de información, lo que permitió que se centrara en la adquisición de información a través de la piel, además de impedir que la inspección visual revelase datos sobre los motores que estaban actuando. Para indicar qué motores detectaba, el sujeto de pruebas disponía de un panel en el que están situados 6 pulsadores en una disposición similar a la de los motores de su antebrazo. Al pulsar cada uno de estos, se ilumina un LED de una matriz 2x3, lo que permite identificar a simple vista el patrón detectado por él.

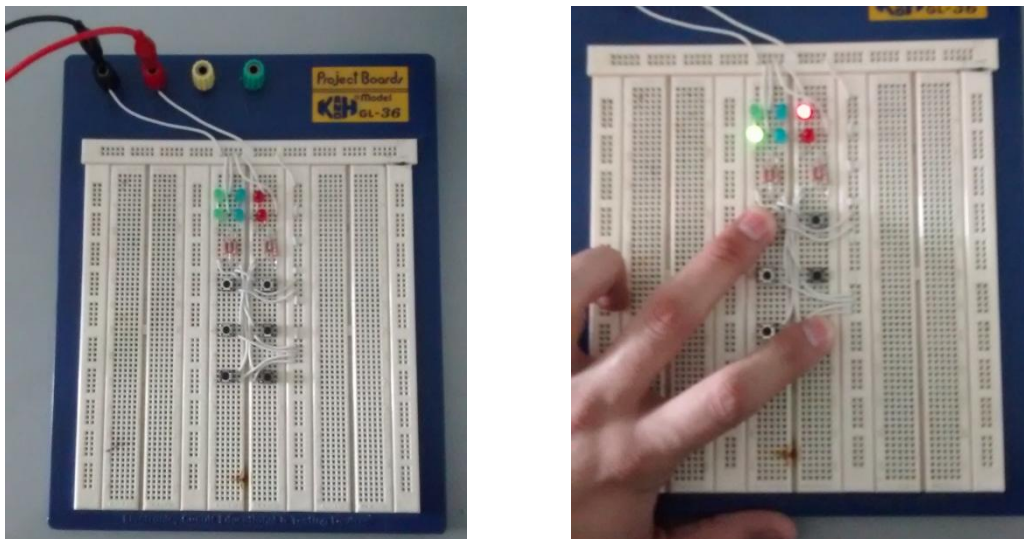


Figura 1.3. Panel de respuesta

Para recoger los resultados se elaboró una hoja de pruebas en la que se dispone de espacio para anotar, además de los datos indicados anteriormente, el nombre del participante, la fecha, el tiempo de entrenamiento que ha empleado para familiarizarse con los motores (se intentó mantener este por debajo de 5 minutos, ya que en experiencias previas se ha comprobado que la vibración continuada sobre los receptores subcutáneos tiene como efecto negativo una sensación de aletargamiento en el brazo que impide que se detecten correctamente las vibraciones) y el número de patrones correctamente identificados. Además, se encuentran reflejadas todas las posibles combinaciones de motores para anotar, de las que se escojan, cuáles se han identificado correctamente. De las 64 posibles combinaciones, en cada prueba se examinaron 21, procurando distribuir equitativamente los patrones seleccionados atendiendo al número de motores que actúan en cada uno de ellos.

Se tomó nota, en las respuestas incorrectas, de los motores detectados por el participante para estudiar los efectos que aparecen al actuar los motores. Por último, la hoja de pruebas dispone de un espacio para redactar las conclusiones de cada prueba individual y de un espacio para fotografías de la disposición de los motores durante la misma.

Pruebas de detección de patrones estáticos					
Nombre	Alfonso Lago Rodríguez			Fecha	11/03/2015
Tiempo de entrenamiento	3:38 min.		Tipo de PWM	3	
Distancia entre motores	8 cm		Duración de la prueba	20:45 min.	
<i>En cada casilla se anotarán los patrones correctamente identificados por el sujeto de pruebas y el número total de patrones con ese número de puntos que se le han presentado.</i>					
Aciertos de 1 punto	3/3		Aciertos de 2 puntos	7/7	
Aciertos de 3 puntos	1/6		Aciertos de 4 puntos	1/4	
Aciertos de 5 puntos	0/1		Aciertos de 6 puntos	0/0	
<i>Marcar con una X los patrones que se reconozcan correctamente, con un - los que no. En la segunda fila, pegar la imagen del patrón detectado por el sujeto de pruebas.</i>					
X	X	X			

Figura 3.4. Fragmento de un formulario de pruebas cumplimentado

Una vez recogidos datos suficientes, se determinó que la distancia longitudinal (es decir, en la dirección del antebrazo) entre motores debe ser de en torno a 10 cm para que las vibraciones de ambos se perciban de manera independiente, mientras que en la dirección transversal debe ser de unos 10 cm en la parte más próxima a la mano y de unos 12 en la más próxima al codo. Atendiendo a estos datos, y habiendo tomado medidas del antebrazo de varios estudiantes para conocer el espacio del que se dispone, se determinó que una matriz de 3x5 actuadores, siendo 3 en la dirección transversal y 5 en la longitudinal sería lo óptimo para actuar sobre el antebrazo.

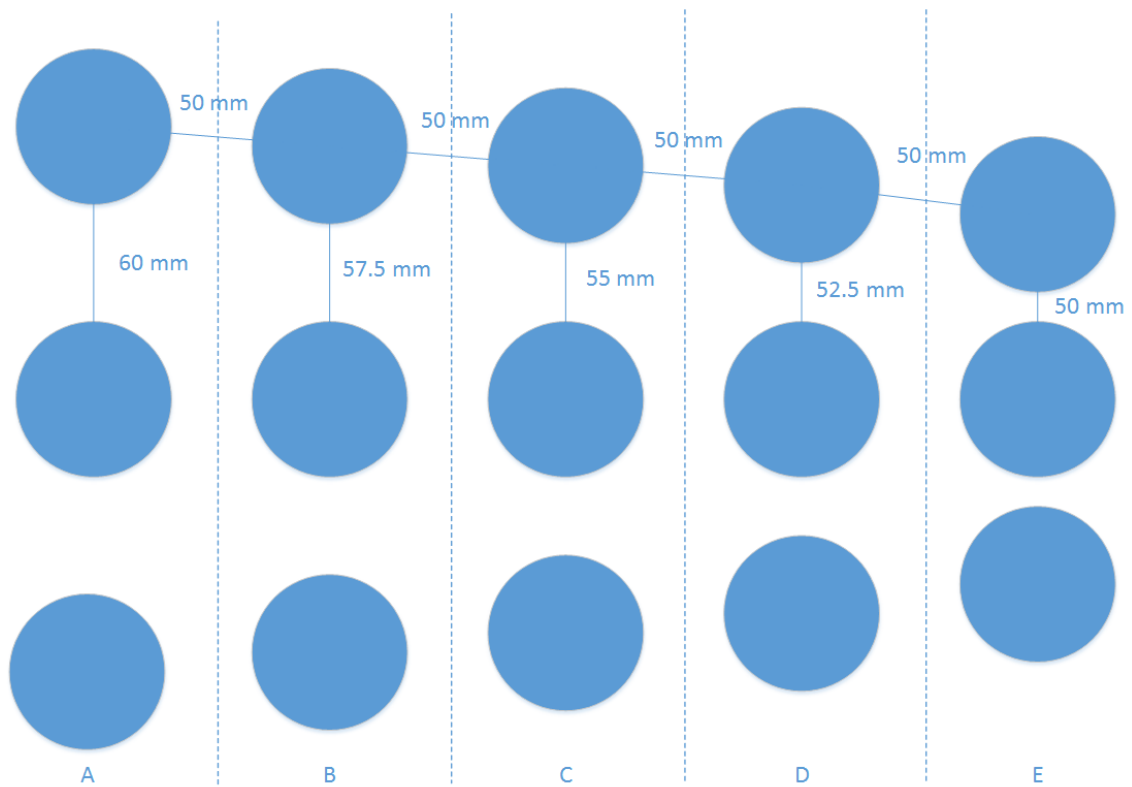


Figura 3.5. Matriz de actuadores

Con esta distribución de motores, se pueden generar tanto patrones estáticos (haciendo actuar únicamente los cuatro que se encuentran en las esquinas y los dos más alejados del centro de la columna central) como trazos dinámicos (coordinando correctamente las vibraciones de los motores para conseguir la ilusión del actuador fantasma).

4. **DISEÑO DEL PROTOTIPO**

A la hora de diseñar el prototipo *SimTac*, se distinguen tres partes principales: El diseño mecánico, encargado de servir como soporte físico para los actuadores y el resto de componentes necesarios para el funcionamiento del dispositivo, manteniendo fijas las posiciones de los mismos; el diseño electrónico, encargado de alimentar los actuadores y transmitir las señales que gobernarán su funcionamiento; y el diseño de software de control, encargado de gobernar el comportamiento del dispositivo en base a los parámetros de funcionamiento que se establezcan para el mismo. Estos tres diseños se complementan entre ellos y no son independientes, por lo que cambios en uno de ellos pueden afectar a los otros dos.

Para los tres diseños se tratará de mantener el presupuesto lo más bajo posible, ya que se trata de un prototipo que solo se empleará para comprobar el posible funcionamiento de un futuro diseño final. En pos de esta meta, se buscará emplear materiales presentes en el laboratorio o cuyo precio no sea muy elevado, además de tratar de reutilizar en la medida de lo posible componentes utilizados en proyectos anteriores.

4.1. **Diseño mecánico**

Dado que finalmente se ha optado por el diseño de un brazalete y por el uso de motores vibradores como actuadores, la forma del soporte estará condicionada por estos dos factores. Como materiales base se emplearán materiales textiles, ya que ofrecen la flexibilidad requerida para adaptarse a los antebrazos de distintos individuos, además de tener un precio que se ajusta a las intenciones de mantener el presupuesto bajo, lo que permitirá adquirir material extra por si más adelante fuera necesario (por ejemplo, en rediseños).

Otro material que se empleará en este diseño es el velcro, que permite incorporar uniones separables que posibilitarán un diseño desmontable, lo que es de interés, ya que al tratarse de un prototipo es probable que sea necesario realizar ajustes sugeridos por las pruebas a realizar conforme estas se vayan realizando. Para realizar las uniones no separables se coserán los componentes entre ellos usando hilo de costura y bies en el caso de que se necesite. El bies se empleará, además, para sujetar los actuadores, puesto que su anchura es suficiente para cubrirlos.

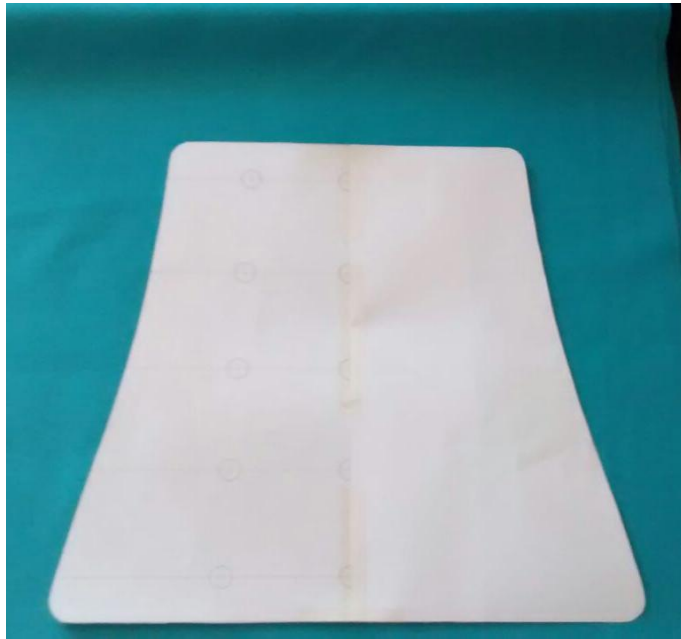


Figura 4.1. Proceso de recortado de material

Como materiales textiles se emplearán la goma eva, por su grosor y nivel de rigidez, que permitirán que se utilice como base a la que sujetar el resto de componentes, y licra para las partes en las que se requieran materiales no rígidos. Dado que las pruebas preliminares utilizando los actuadores sobre la piel revelaron que estos se calientan con el uso hasta alcanzar una temperatura que resultaba incómoda para algunos de los participantes, se situará una lámina de esta tela entre los actuadores y la piel, a fin de evitar este efecto. Como ventaja adicional del empleo de estos materiales, se debe destacar la facilidad de su manejo, ya que obtener piezas con la forma deseada es muy sencillo.

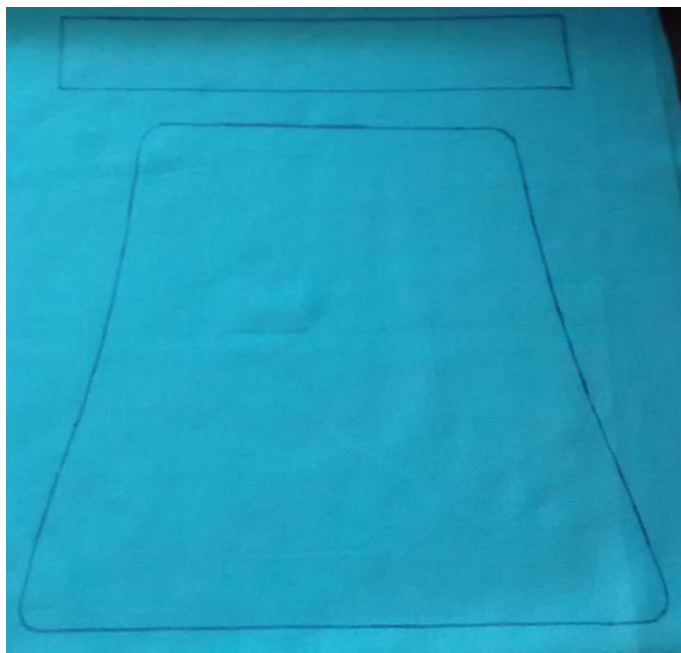


Figura 4.2. Superficie interior del dispositivo

A la hora de situar los actuadores, se ha optado por emplear dos láminas de tela, una de licra y la otra de goma eva, entre las que se encontrarán estos. Para mantener sus posiciones fijas, se coserán a la cara interior (la licra, que se encontrará en contacto con la piel) tres tiras de bies. Estas costuras se realizarán solo por uno de sus laterales y, a intervalos marcados por las posiciones requeridas para los motores, se realizarán dos costuras transversales situadas a un centímetro de distancia. Así, se crearán pequeños sacos situados en las posiciones de los motores, lo que permitirá formar la matriz simplemente introduciéndolos en ellos, además de facilitar posibles labores de mantenimiento (ya que durante las pruebas previas se observó que las soldaduras de los motores se rompían con facilidad tras un uso prolongado).

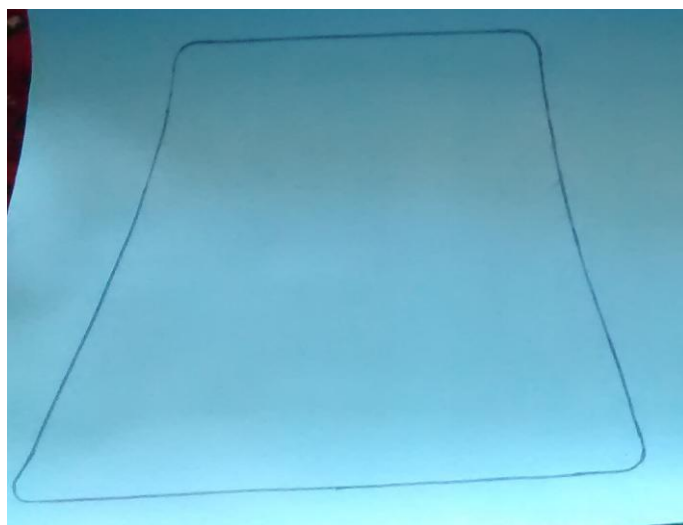


Figura 4.3. Superficie exterior del dispositivo

Sobre la lámina interior se situará una de idéntica forma de goma eva y se coserán entre ellas, utilizando bies para otorgar mayor resistencia a la unión, por uno de sus laterales. En el lateral opuesto se coserán pequeñas tiras de velcro a ambas láminas (a una de ellas de cintas enmarañadas y a la otra de ganchos), lo que permitirá el cierre de la solapa que forman ambas láminas, quedando los motores entre ellas. En la cara exterior se practicarán dos agujeros a lo largo de la línea central que servirán como puntos de acceso para el cableado de los motores. Para cerrar ambas piezas sobre el antebrazo, creando así el brazalete, se coserán tiras de velcro complementarias en ambos extremos de la lámina superior, de manera que al rodear el antebrazo la lámina se sujete en esa posición.



Figura 4.4. Soporte para placas

Dado que para gobernar los motores serán necesarias placas de circuito impreso, se ha diseñado un soporte para estas que permita sujetarlas con facilidad al brazalete. Este soporte será fabricado por prototipado rápido y se trata de una bandeja con un vaciado central y dos sujeciones en los laterales. Las placas se situarán en el vaciado central, de manera que su movimiento en ese plano quedará restringido, y para impedir su movimiento vertical se emplearán gomas elásticas que las rodearán. El motivo para ello es, de nuevo, facilitar las funciones de mantenimiento, ya que estas sujeciones se pueden quitar rápida y fácilmente.

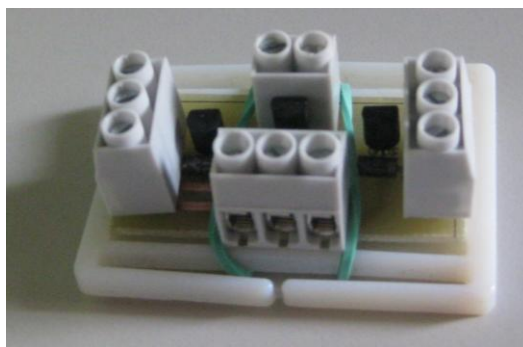


Figura 4.5. Placa montada sobre el soporte

Para sujetar estas bandejas al resto del brazalete, se pasará una tira de licra a través de sus sujeciones, uniéndolas entre sí y manteniendo sus posiciones relativas fijas. Esta tira tendrá una tira de ganchos de velcro en cada uno de sus extremos, que se sujetarán a tiras de igual longitud de fibras enmarañadas sujetas en los extremos de la línea central del brazalete, de manera que las placas queden situadas en orden longitudinalmente.

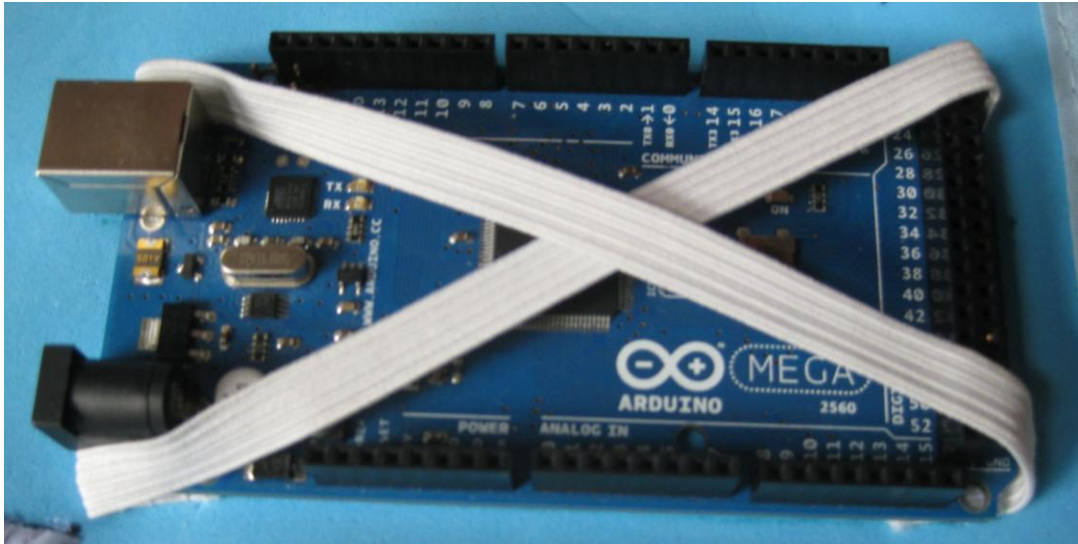


Figura 4.6. Arduino sujeto al brazalete

Dado que el software diseñado se volcará sobre una tarjeta Arduino Mega 2560, esta habrá de sujetarse sobre el brazalete para que todos los componentes estén integrados (como exige un dispositivo *wearable*). Para ello, se coserán dos tiras de goma elástica formando una cruz dentro de la cual se situará la tarjeta, lo que no solo garantizará que mantenga su posición, sino que también facilitará las labores de mantenimiento al ser fácil de extraer.

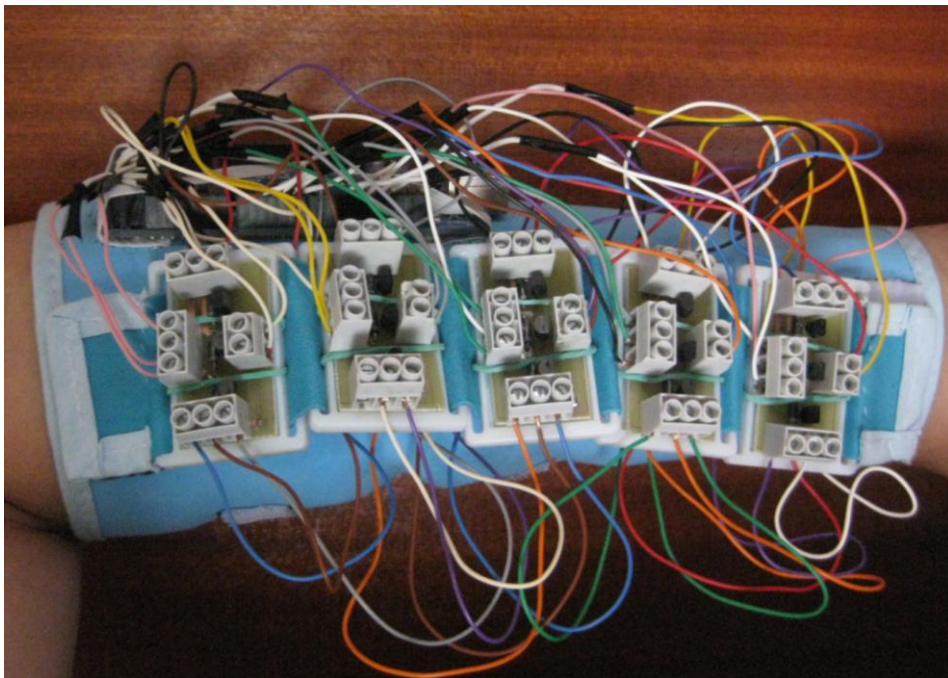


Figura 4.7. Brazalete completo

4.2. Diseño electrónico

La parte electrónica del dispositivo está compuesta por las placas diseñadas expresamente para el proyecto, destinadas a controlar la alimentación de los motores, y por la tarjeta Arduino Mega 2560.

4.2.4. Arduino Mega 2560



Figura 4.8. Arduino Mega 2560

Sobre esta tarjeta se volcará el software desarrollado, ya que será la encargada de controlar el comportamiento de los motores enviando las señales adecuadas para activarlos. Para ello se emplearán sus pines de entrada/salida digital, que pueden dar un valor de 0 o 5 voltios en función de si la salida es 0 o 1, respectivamente.

Estos valores se emplearán para alternar los transistores de las placas diseñadas entre corte y saturación, controlando la llegada de intensidad de corriente a los motores y, con ello, su vibración. Las conexiones con el resto de elementos se realizarán a través de cables de cobre, tratando de distribuir los pines de manera que resulte sencillo repetir el conexionado por si hubiera que desmontar el prototipo en algún momento.

La tarjeta puede recibir alimentación vía un conector tipo jack o vía conexión por USB con un computador. Se optará por este último método, dado que ya es necesaria la conexión entre Arduino y el ordenador para transmitir a este las órdenes de funcionamiento. Como almacenamiento cuenta con una memoria flash de 256 kb, lo que limita el tamaño y complejidad de los modelos de Simulink que vayan a volcarse sobre él para ser ejecutados. Su velocidad de reloj es de 16 MHz, de manera que, de ejecutarse un modelo directamente sobre él y no a través del computador en modo externo, se podrían conseguir señales PWM de gran precisión.

4.2.2. Placas electrónicas de diseño propio

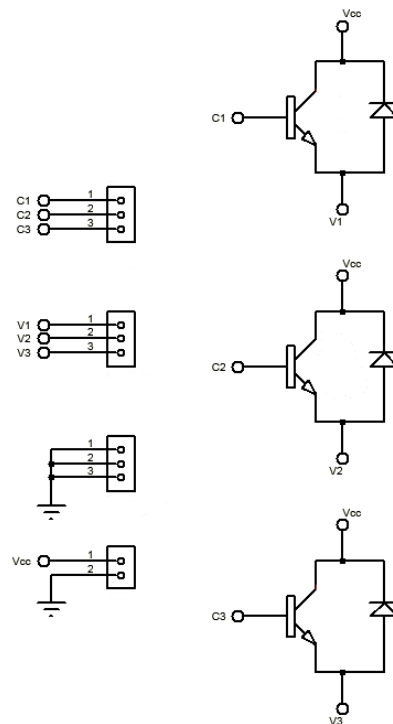


Figura 4.9. Circuito de control de cada hilera de motores (A, B, C, D o E)

En lo concerniente al diseño de componentes propios, se necesita un circuito impreso que permita integrar en el menor espacio posible los componentes necesarios para el funcionamiento de los actuadores. Para otorgar mayor flexibilidad al brazalete, simplificar el diseño y facilitar labores de mantenimiento, se ha optado por emplear cinco placas separadas (A, B, C, D y E) encargadas cada una de controlar el comportamiento de tres de los motores (las hileras A, B, C, D y E, respectivamente).

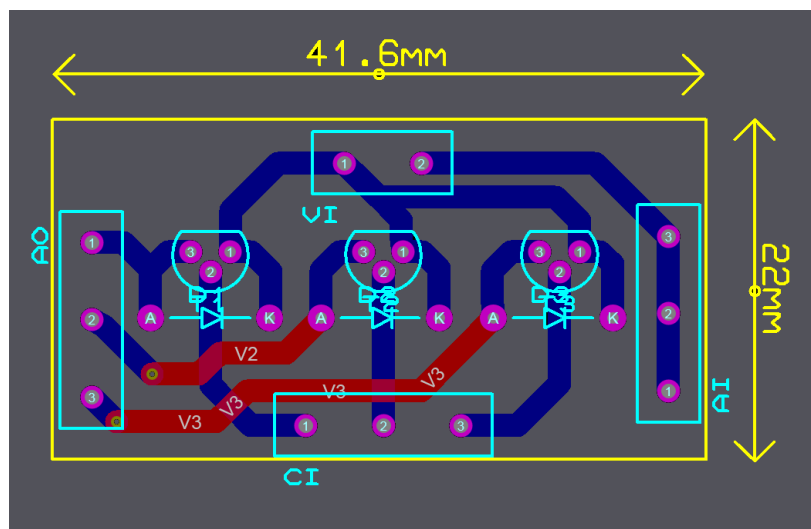


Figura 4.10. Diseño de la PCB a utilizar

Los componentes necesarios para lograr este propósito son transistores, diodos y conectores. Los transistores estarán alimentados a 5 V y para controlar el paso de corriente se emplearán señales provenientes de la placa Arduino Mega 2560, sobre la que se volcará el software. Los diodos se utilizarán como protección contra posibles polarizaciones inversas de los transistores, aumentando la seguridad del conjunto. Para alimentar el circuito, además de dirigir las señales de control de los transistores y las conexiones a alimentación y masa de los actuadores se emplearán regletas clema de dos conectores (en el caso de la alimentación) o tres (en el caso de las señales a dirigir).

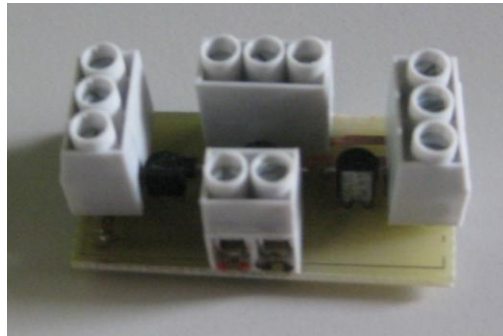


Figura 4.11. Placa electrónica completa

Para alimentar todo el conjunto se ha optado por utilizar la placa Arduino Mega 2560 a fin de reducir, en la medida de lo posible, el número de elementos necesarios para hacer funcionar el prototipo, lo que permitirá dotarlo de una mayor portabilidad. Así, de este no solo se extraerán las señales de 0-5 V que sirven para controlar los actuadores, sino también conexiones a 5 V y masa para alimentar los transistores. Esto tiene como desventaja un rendimiento menor para los motores si varios de los controlados por una placa están activos a la vez, pero dado que esto solo ocurrirá en el modo trazos y durante periodos de tiempo muy cortos, se considera un efecto desdeñable.

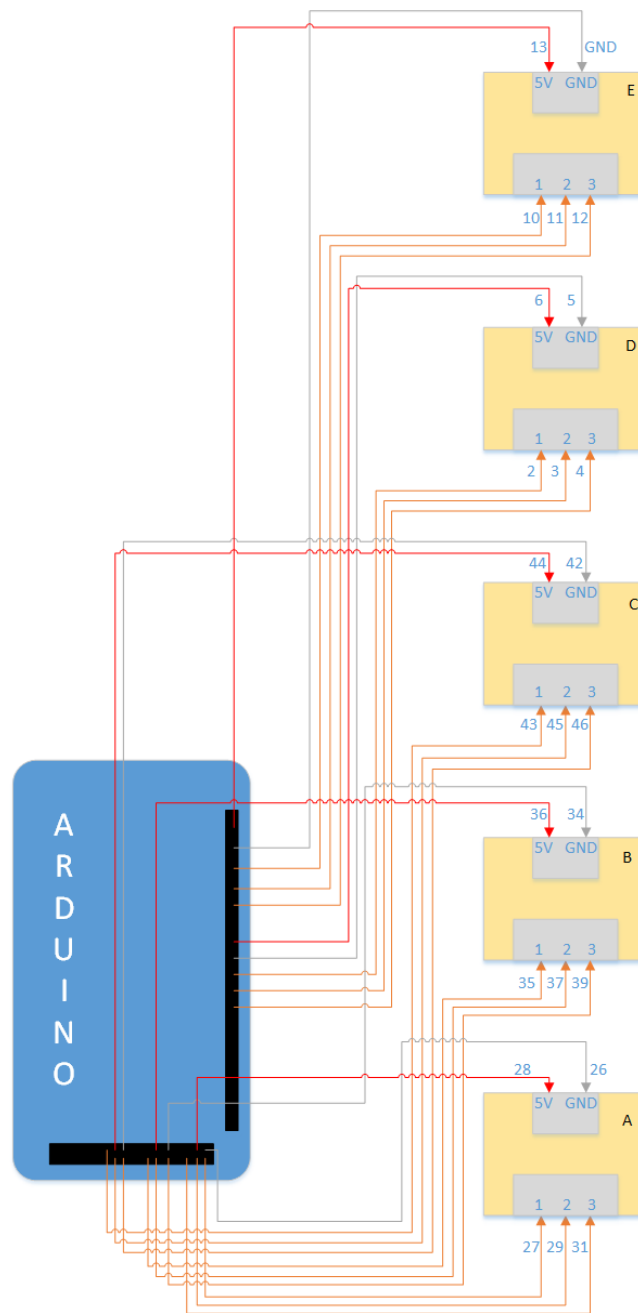


Figura 4.12. Conexión de Arduino con el resto de elementos

4.3. Diseño de software

Para implementar el software necesario para el funcionamiento del prototipo, se ha optado por la creación de un modelo de Matlab Simulink que incluya las funcionalidades requeridas y que luego será ejecutado en la placa Arduino Mega 2560. El motivo para seleccionar este método es la sencillez que ofrece Simulink a la hora de generar una señal PWM que reproduzca una forma de onda dada, lo que permitirá excitar los actuadores de distintas maneras a fin de determinar la más adecuada para la

aplicación. Además, por tratarse de un método de programación gráfica, la realización de cambios sobre un código ya finalizado se simplifica enormemente.

En el software se han incluido cuatro modos de operación: Configuración (que permite seleccionar la forma de onda con la que se desea excitar a los motores, además de las frecuencias de muestreo y de la onda original para conseguir un ajuste más preciso), Independientes (que permite seleccionar de manera independiente qué motores se desea excitar con la forma de onda seleccionada en el modo Configuración), Braille (que permite reproducir las letras del alfabeto en braille haciendo vibrar los actuadores adecuados con la forma de onda seleccionada en el modo Configuración) y Trazos (que permite seleccionar uno de seis trazos preprogramados, que se reproducirá excitando los motores con la forma de onda seleccionada en el modo configuración).

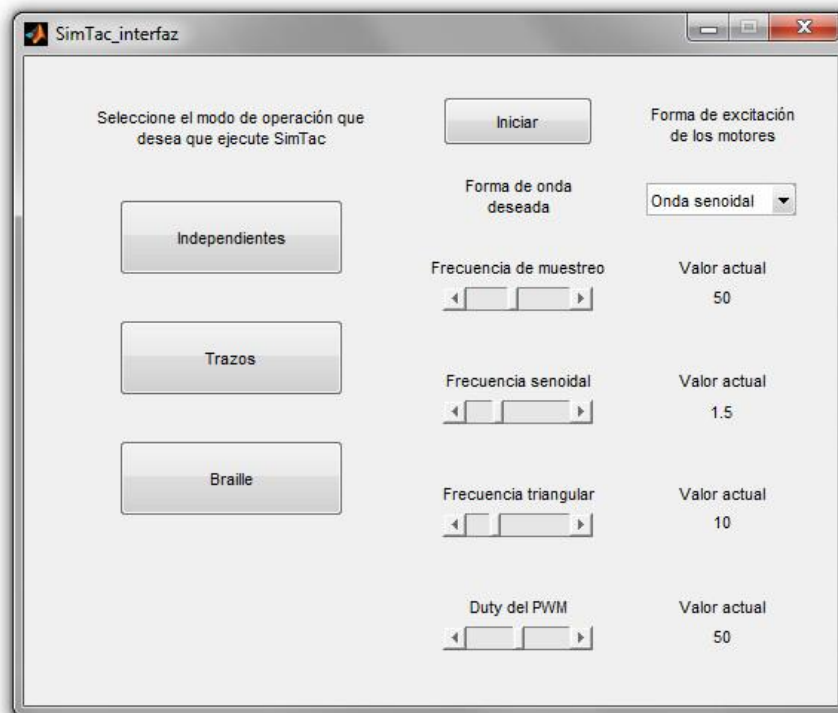


Figura 4.13. Interfaz de configuración

Cada uno de estos cuatro modos contará con su propio modelo de Matlab Simulink (ya que en las pruebas iniciales se comprobó que un modelo que integrase las cuatro funcionalidades requería más memoria de la que dispone Arduino Mega 2560), cuyos parámetros se controlarán a través de un interfaz gráfico creado para ello y desde el que se podrá acceder al resto de modos. Una vez seleccionado el modo de operación, el modelo se ejecutará en modo externo sobre la tarjeta Arduino, lo que permitirá variar sus parámetros en tiempo real desde el ordenador y comprobar los cambios en el funcionamiento del prototipo.

Todos los interfaces gráficos se han desarrollado con la herramienta Guide Matlab (Graphic User Interface Development Environment), lo que facilita el proceso de comunicación con los modelos de Simulink al estar ejecutándose todas las órdenes en el entorno Matlab, que dispone de medios de comunicación entre sus diferentes módulos.

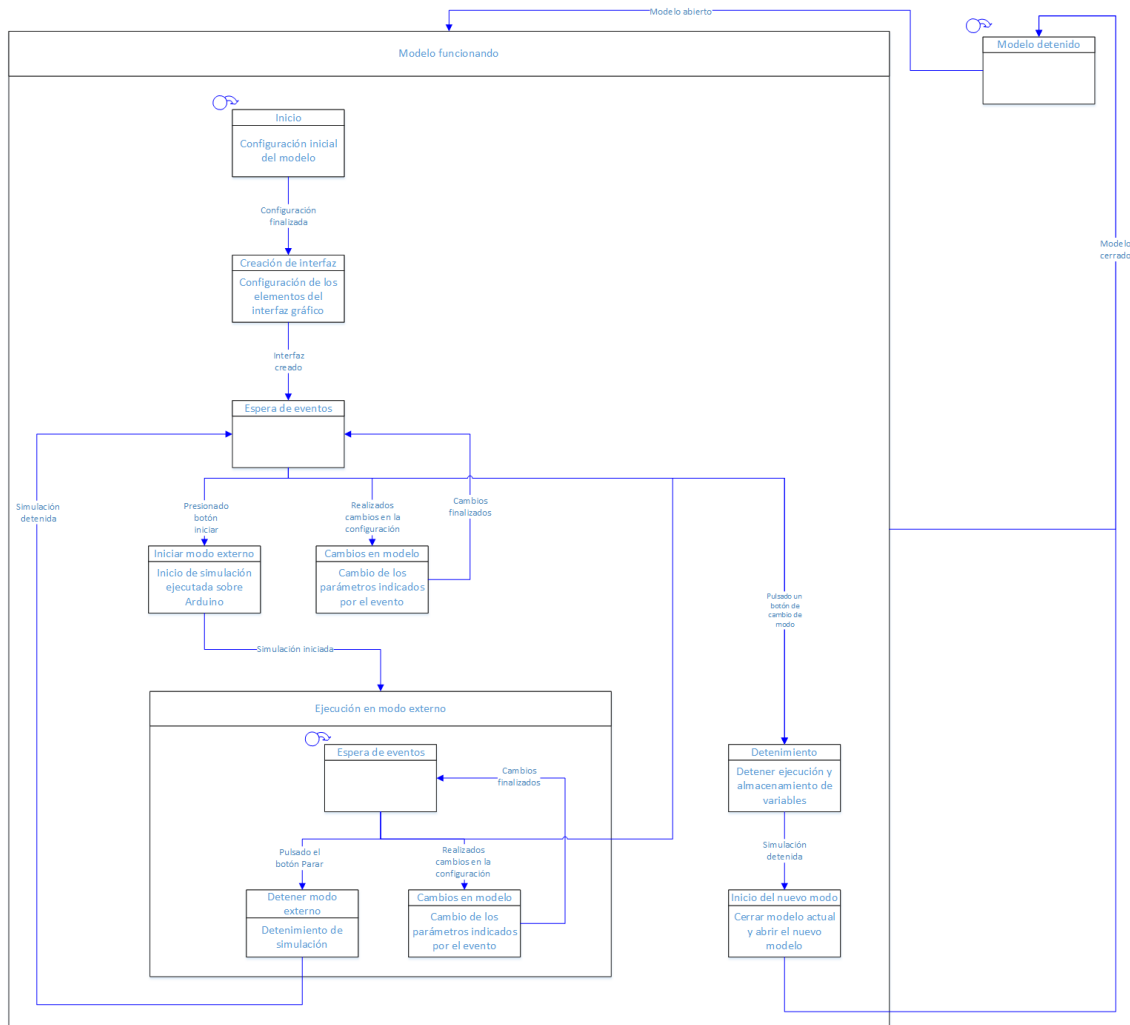


Figura 4.14. Diagrama de estados de los modelos

Todos los modos de funcionamiento se conforman según el diagrama de estados de la Figura 4.14., con pequeñas variaciones según las distintas funcionalidades que tienen incluidas. Son controlados a través de las interfaces gráficas diseñadas para cada uno de ellos, que se ejecutan automáticamente cuando se inicia el modelo correspondiente.

4.3.1. Modo Configuración

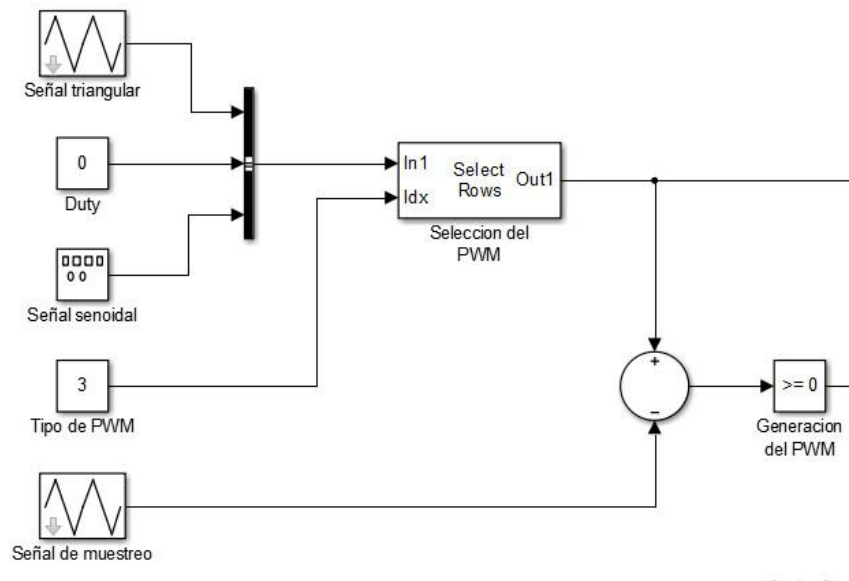


Figura 4.15. Selección de la forma de onda en el modelo

Como posibles formas de onda de excitación de los motores se han seleccionado una onda triangular, una onda senoidal y una señal constante. Para generar las señales PWM a partir de estas, se les ha restado una señal triangular de idéntica amplitud y se ha comparado el resultado con 0, de manera que la señal de salida sea igual a 1 cuando la onda triangular se encuentre por debajo de la onda original, y 0 en el caso contrario. Con esto se genera una señal PWM que reproduce la onda original con mayor precisión cuanto mayor sea la frecuencia de la onda triangular que se emplea para muestrear esta.

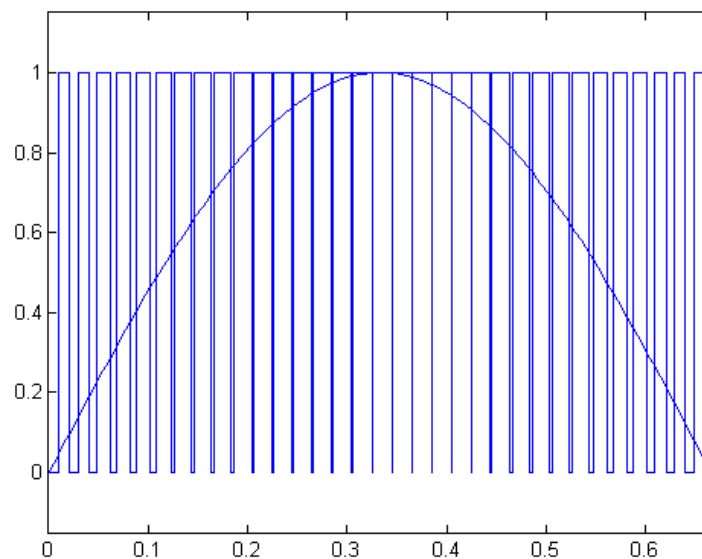


Figura 4.16. Generación de una señal PWM a partir de una onda senoidal

Para seleccionar con qué forma de onda se desea excitar los motores, se ha incorporado al interfaz un menú desplegable en el que aparecen las tres posibilidades. Una vez escogida la onda original, se pueden modificar los parámetros del PWM generado a partir de ella utilizando barras deslizantes cuyos valores máximos y mínimos están prefijados. Una vez que se cambia de modo, los valores seleccionados durante la configuración son almacenados para ser leídos durante la configuración inicial de cada modelo.

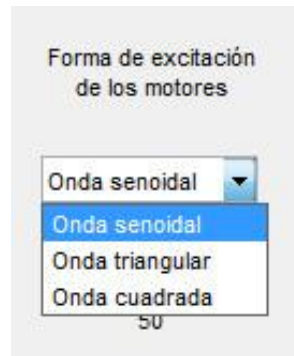


Figura 4.17. Selección de la forma de onda en el interfaz

4.3.2. Modo Independientes

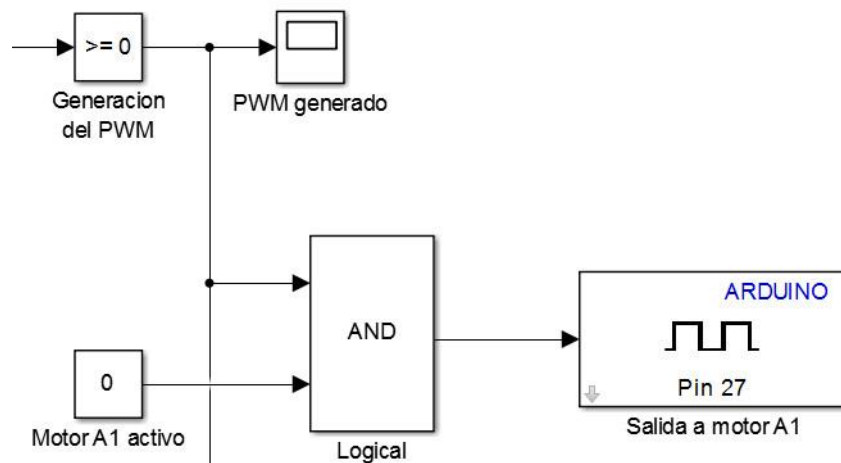


Figura 4.18. Activación de los motores individuales en el modelo

En este modo cada motor opera por separado de forma continua una vez es seleccionado, por lo que todos ellos deberán recibir la señal generada en el anterior modo cuando se requiera. Para controlar el envío de esta señal desde Arduino, se hacen llegar la señal PWM generada y el valor de una constante booleana de control a una puerta AND, cuya salida será el valor que se asigne al pin de Arduino correspondiente al motor.



Figura 4.19. Interfaz del modo Independientes

Para cambiar el valor de esta constante entre 0 y 1, se utilizan los botones seleccionables del interfaz correspondientes a cada motor. Como este modo permite que funcionen varios motores simultáneamente, cuando se desee detener uno que ya esté funcionando deberá pulsarse de nuevo el botón correspondiente.

4.3.3. Modo braille

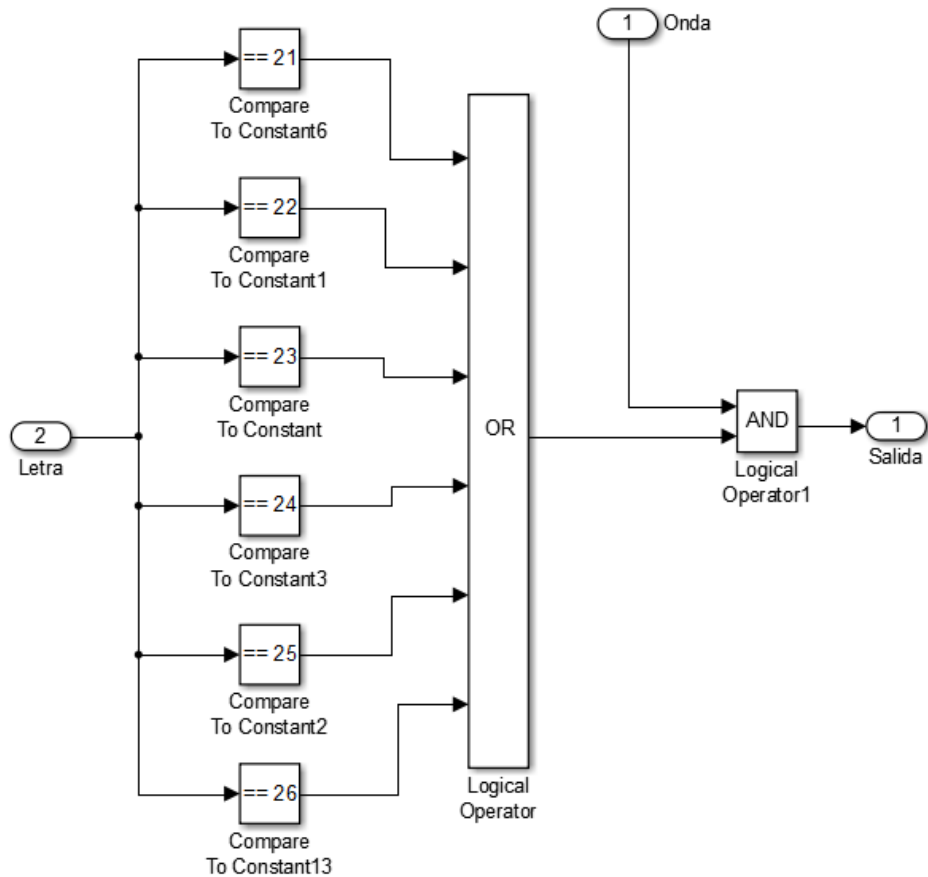


Figura 4.20. Bloque de control de salida a motores del modo Braille

En este modo de operación solo se emplearán los motores de los extremos de la matriz (E1, E3, A1 y A3) y los dos de la banda central que se encuentran en los extremos (C1 y C3), lo que forma una matriz 2x3 similar a la del lenguaje braille. Para cada uno de estos motores se ha creado un bloque de Matlab Simulink que, en función de la letra seleccionada, activa o no el motor atendiendo al símbolo en braille que se pretende reproducir.

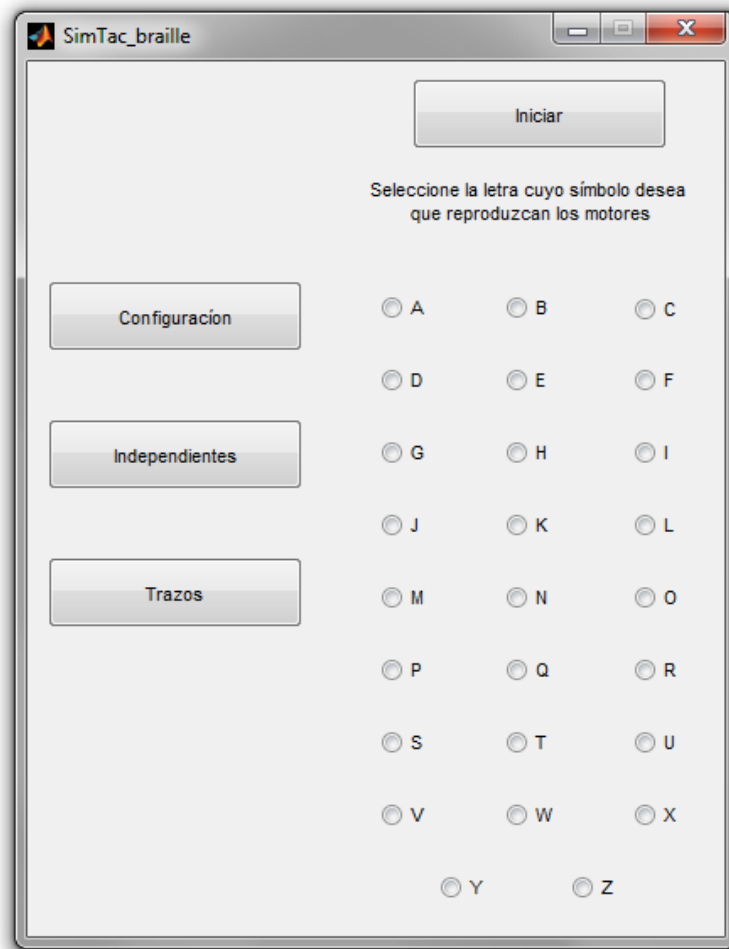


Figura 4.21. Interfaz del modo Braille

Cuando se selecciona la letra deseada en el interfaz, se cambia el valor de una constante en el modelo que indica cuál de ellas se ha escogido. En este caso, al no poder reproducirse dos símbolos simultáneamente, cuando se selecciona una letra automáticamente se descartan todas las demás.

4.3.4. Modo trazos

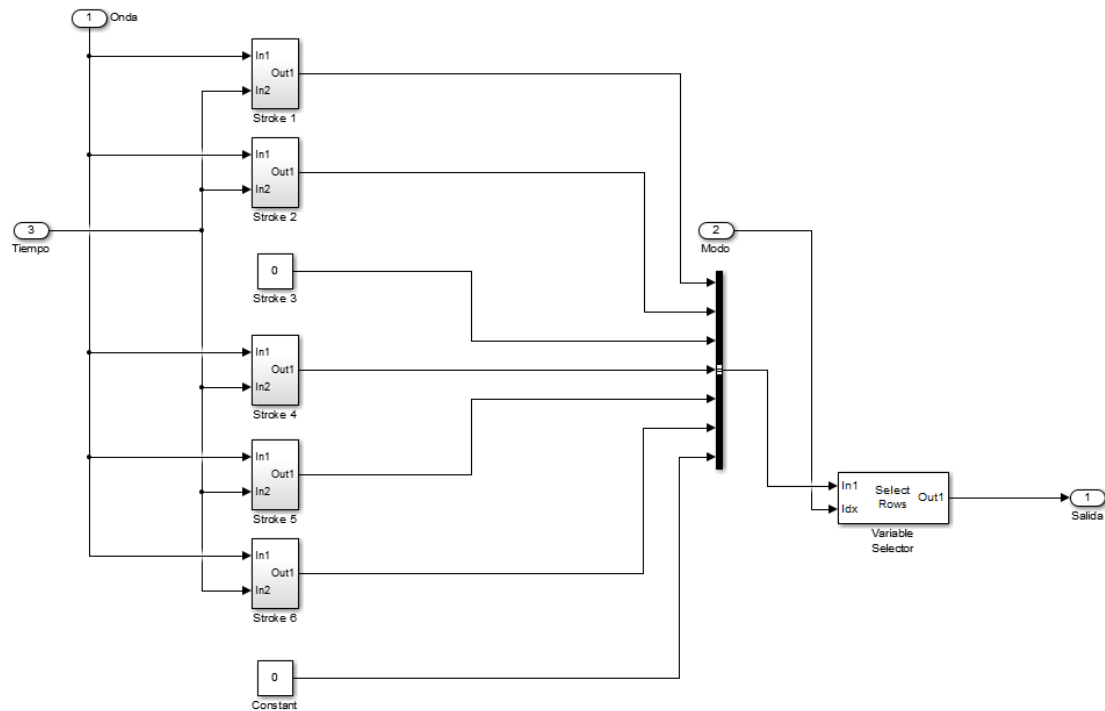


Figura 4.22. Bloque de salida a motor en el modo Trazos

Este modo de operación, a diferencia de los demás, necesita conocer el tiempo de simulación para permitir la correcta coordinación de los motores para formar los trazos, por lo que en este modelo se ha incluido un bloque que indica el tiempo. Esta información, además del trazo seleccionado y la forma de onda empleada, se transmite a un bloque de Matlab Simulink personalizado que será el encargado de gobernar los motores.

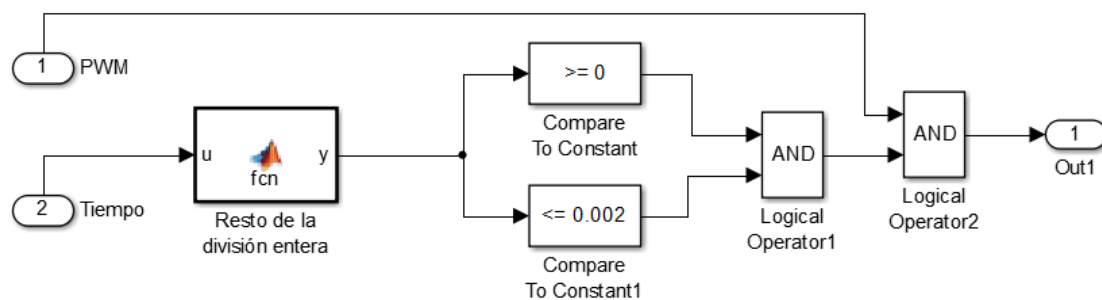


Figura 4.23. Bloque de control de tiempo de activación del motor en el modo Trazos

Cada uno de los trazos se ha definido previamente y se ha establecido el tiempo que cada motor debe permanecer activo durante el mismo, de manera que la coordinación sea correcta. Esto se ha conseguido realizando la división entera entre el tiempo de simulación y la duración total del trazo, comparando después el resto obtenido con el

tiempo durante el cual debe estar activo el motor, caso en el que se permite la transmisión a este de la señal PWM generada.

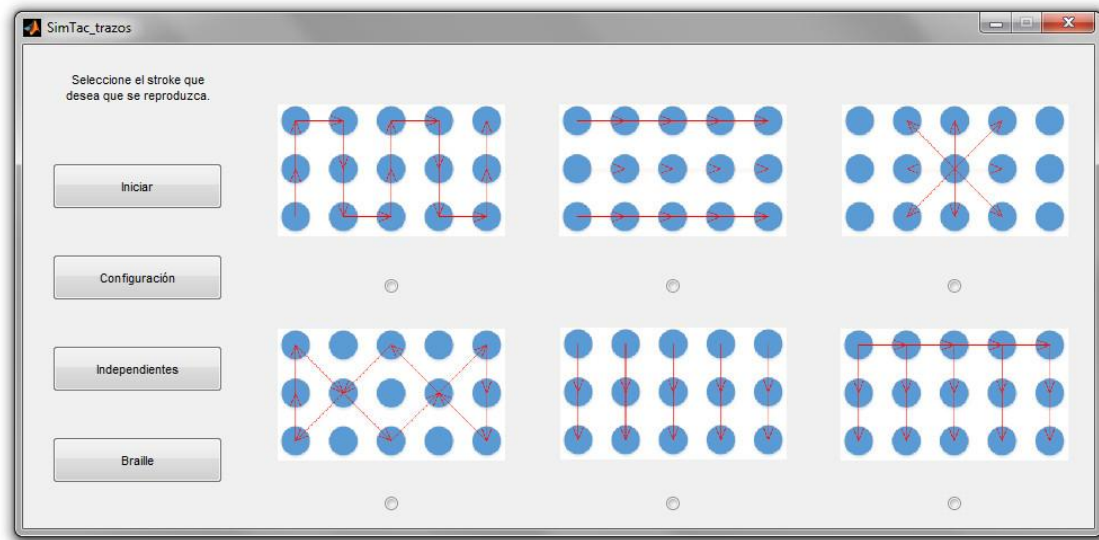


Figura 4.24. Interfaz del modo Trazos

Al igual que en el modo de operación anterior, al seleccionar un nuevo trazo se deben desmarcar todos los demás, ya que solo uno de ellos puede estar activo. Los trazos predefinidos han sido escogidos para comprobar si el comportamiento de los mecanorreceptores cutáneos es o no isótropo, es decir, si responden de igual manera a estímulos provenientes de diferentes direcciones.

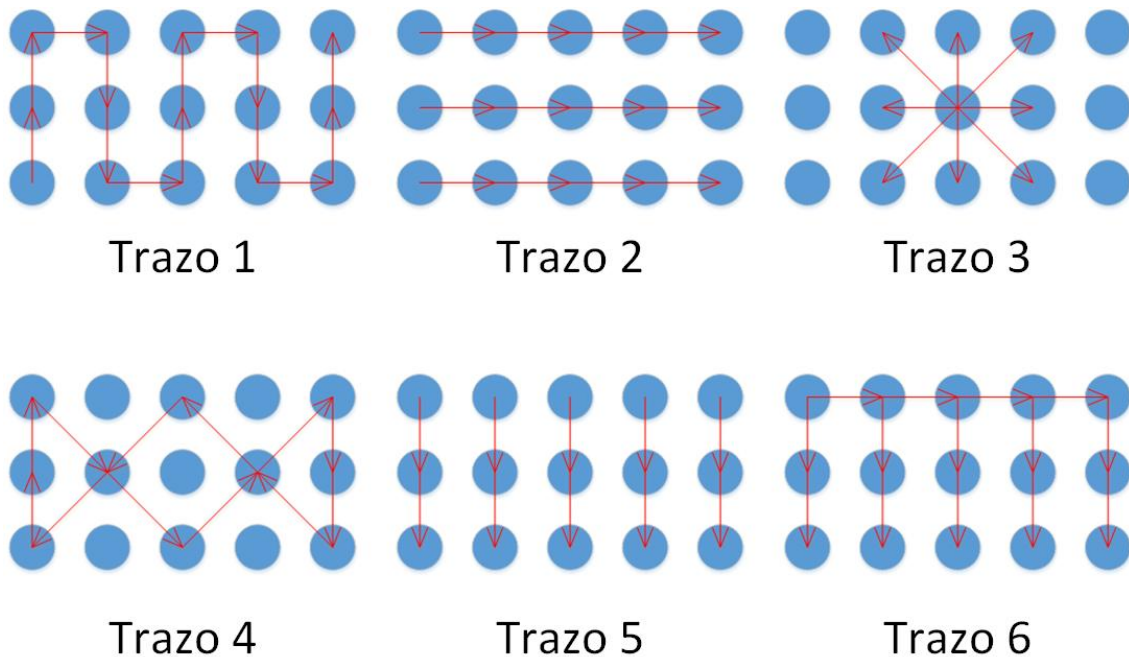


Figura 4.25. Trazos predefinidos

4.3.5. Adaptabilidad del software

El software diseñado para el prototipo cuenta con una ventaja que lo ha hecho preferible frente a formas de programación basadas en código escrito: Su capacidad de adaptación a cambios. Mientras que alteraciones en codificación escrita requerirían mucho tiempo para llevarse a cabo, las alteraciones en programación gráfica permiten realizar cambios rápidamente, especialmente cuando estos cambios o añadidos son similares a otras partes del código ya empleadas.

De esta forma, el software desarrollado permite fácilmente añadir, por ejemplo, nuevos trazos si se considerara necesario, además de modificar los ya existentes con alteraciones de los parámetros de los bloques utilizados.

Con esto se pretende que el prototipo sea adaptable a las demandas que puedan surgir de los usuarios conforme se vayan realizando las pruebas para validar su diseño, de manera que un mismo usuario podría probar una versión nueva basada en sus peticiones que fuera desarrollada conforme avanza la prueba. Estos cambios en tiempo real pueden llevarse a cabo por estar ejecutándose el modelo en modo externo, de forma que los cambios llevados a cabo en el modelo se reflejan prácticamente en tiempo real sobre Arduino.

Esta interacción entre los sujetos de pruebas y el prototipo que están probando conseguirá un mejor desarrollo del mismo y unos resultados más fiables de las pruebas, que permitirán obtener información acerca de la forma requerida a un posible modelo industrial o segundo prototipo basado en los resultados de estas.

5. **EXPERIMENTACIÓN CON EL PROTOTIPO**

Una vez finalizado el montaje del prototipo, se someterá este a varias pruebas que permitan comprobar si el diseño general es el correcto y, en caso de no serlo, que indiquen qué cambios habrán de realizarse en el mismo. Al ser este un proyecto de investigación en el que no existe garantía alguna de que el dispositivo diseñado sea viable, las pruebas a realizar también estarán orientadas a determinar si el prototipo cumple con los requisitos mínimos que permitan decidir si un diseño industrial sería efectivo.

5.1. **Protocolo de pruebas**

Para comprobar el funcionamiento del prototipo construido, se realizarán pruebas con un grupo variado de individuos a fin de obtener datos fiables. A estos individuos se les pedirá que comprueben el funcionamiento de los modos de experimentación principales (Braille y Trazos), empleándose el modo Configuración para seleccionar el modo de vibración más adecuado y el modo Independientes como entrenamiento para familiarizarse con la situación de los actuadores. Se registrará el modo de vibración y los parámetros del mismo escogidos por cada usuario, pudiendo repetirse la prueba con otros modos y/o parámetros si se juzgase conveniente.

Además, se tratará de comprobar si este diseño permite la estimulación de otras partes del cuerpo (no únicamente del antebrazo) situándolo sobre muslos, espinillas o bíceps. Durante esta fase el diseño de software será susceptible de sufrir cambios para mejorar la experiencia de los participantes, incluyendo estos cambios pero no limitándose a:

- Rediseño de los trazos, cambiando los tiempos de solapamiento o de actuación de los actuadores a fin de conseguir con mayor claridad la sensación deseada.
- Descarte y/o creación de trazos si se considera alguna sensación superflua o digna de estudio, respectivamente.
- Alteración de las frecuencias seleccionadas para la onda de excitación de los actuadores, bien en el caso de la frecuencia de muestreo de la onda original, bien en el caso de la frecuencia de la onda original.
- Descarte y/o inclusión de nuevas formas de excitación de los motores, si se consideran estas innecesarias o útiles durante las pruebas, respectivamente.
- Cambios en la interfaz de usuario para facilitar la selección de opciones cara a agilizar el proceso de pruebas.
- Simplificación en el modelo inicial, aún a costa de perder opciones durante las pruebas, para agilizar el proceso.

En cada prueba del modo Trazos se tomará nota de la facilidad del individuo para reconocer el patrón descrito por cada uno de los trazos preprogramados, registrándose el patrón identificado por el usuario además de cualquier otro dato de interés provisto por

este a fin de determinar formas más eficaces de describir trazos sobre la piel. Para ello, se ha diseñado una tabla para pruebas en la que se dispone de espacio para esbozar el patrón detectado durante la prueba y para las anotaciones pertinentes.

Las pruebas del modo Braille, por su parte, están destinadas no solo a evaluar la facilidad de los individuos para identificar las vibraciones simultáneas de distintos motores, sino también a comprobar si la recepción de información a través de los receptores cutáneos es más eficaz que a través de la vista. Así, se intercalarán letras en braille reproducidas empleando los actuadores con letras en braille cuyo patrón se muestra por pantalla, para posteriormente solicitar al participante que reproduzca algunos de estos patrones en el apartado de la hoja de pruebas destinado a este uso.

También se tomará nota, en ambos casos, del tiempo que precisa el sujeto de pruebas para procesar la información que está recibiendo, es decir, del tiempo transcurrido desde el inicio del estímulo hasta que se indica la naturaleza de este. Esto también será importante a la hora de determinar la viabilidad del prototipo, ya que en el caso de que se reciba correctamente la información, esta deberá poder procesarse en un tiempo razonable a fin de poder competir con las vías visual y auditiva.

Ambas pruebas tienen como objetivo determinar la viabilidad de un dispositivo similar al prototipo *SimTac* destinado a enviar información por medios hápticos, bien para fines recreativos (como puede ser interactuando con videojuegos o películas) o para fines técnicos (para transmisión de información a individuos cuyos canales de recepción principales, es decir, la vista y el oído, ya están registrando otros datos).

Dado que estudios previos sobre la materia parecen indicar que si se emplean para transmitir información los dispositivos hápticos funcionan de manera más eficiente si suponen un canal de recepción secundario (es decir, si la atención del sujeto está centrada en información visual o auditiva, por ejemplo), se estudiará, de manera aleatoria, la influencia de distracciones externas entre los sujetos.

Así, se dividirá el grupo de pruebas en tres subgrupos: Aquellos que son sometidos a la prueba sin ningún tipo de distracción o aislamiento, aquellos que son aislados de otros canales de información (expuestos a ruidos rosas y con los ojos vendados) y aquellos que son expuestos a distracciones visuales y auditivas (con un vídeo, por ejemplo).

Para considerar los resultados obtenidos como fiables, el grupo de pruebas debería ser de en torno a la veintena de personas, ya que una cantidad menor podría incurrir en diferencias entre individuos grandes que invaliden los datos obtenidos, no permitiendo obtener información fiable del comportamiento del individuo medio ante el prototipo. Se tratará, en la medida de lo posible, de tomar datos de individuos de distintas edades y sexos a fin de compensar posibles desviaciones de la media causadas por alguno de estos factores.

tiempo y ausencia casi total de vibración durante un intervalo similar. Esto ha impedido obtener resultados concluyentes acerca de la influencia de la forma de excitación de los actuadores a la hora de procesar la información a través de los mecanorreceptores.

Algunos participantes también han indicado más facilidad para identificar vibraciones en la zona cercana a la muñeca y en la cercana al codo que en la zona central del antebrazo. Además, al aplicarse los trazos se ha observado que es mucho más sencillo identificar el número 5, que desplaza la vibración de todos los motores en la dirección transversal del antebrazo. Los participantes también han identificado con mayor facilidad los trazos cuando la secuencia de motores se mantiene dentro de las direcciones transversal y longitudinal, habiéndose registrado dificultades cuando el trazo realiza movimientos en diagonal dentro de la matriz de actuadores.

Esto viene a confirmar que, a efectos de sensibilidad a vibraciones, el antebrazo no tiene propiedades isotropas, lo que indica que sería adecuada una redistribución de los elementos de la matriz de actuadores para adecuarse mejor a esta circunstancia. Basándose en las experiencias, quizás una nueva programación de los trazos haciendo más énfasis en la dirección transversal al antebrazo (los que se emplean actualmente tienden a desplazar las vibraciones en la dirección longitudinal del antebrazo) sería más efectiva a la hora de transmitir información a través de trazos.

Se ha observado que durante los primeros minutos de la prueba a los participantes les resulta mucho más difícil identificar patrones y vibraciones individuales de motores que una vez que esta ya se encuentra avanzada. Esto se achaca a la falta de experiencia, ya que los dispositivos hápticos de este tipo no son muy habituales y el cerebro puede necesitar un tiempo para aclimatarse a este tipo de estímulos.

Para subsanar esta circunstancia, se ha incrementado la duración de las pruebas, sometiendo al sujeto varias veces a los mismos trazos alternándose entre sí a fin de comprobar si, conforme avanza la prueba, la identificación de estos mejora. El resultado de esta medida ha sido positivo, ya que tras haberseles aplicado todos los trazos una vez, la práctica totalidad de los participantes ha sido capaz de identificarlos correctamente al aplicárseles de nuevo.

Las primeras pruebas han mostrado que algunos de los diseños iniciales de trazos resultan inadecuados. Los participantes han indicado que el trazo 5 resulta claramente distinguible, mientras que los trazos 2 y 3 se ejecutan con una intensidad de vibración demasiado baja para resultar reconocible. Por este motivo, se ha considerado conveniente descartar ambos y generar dos nuevos más acorde con las prestaciones del brazalete.

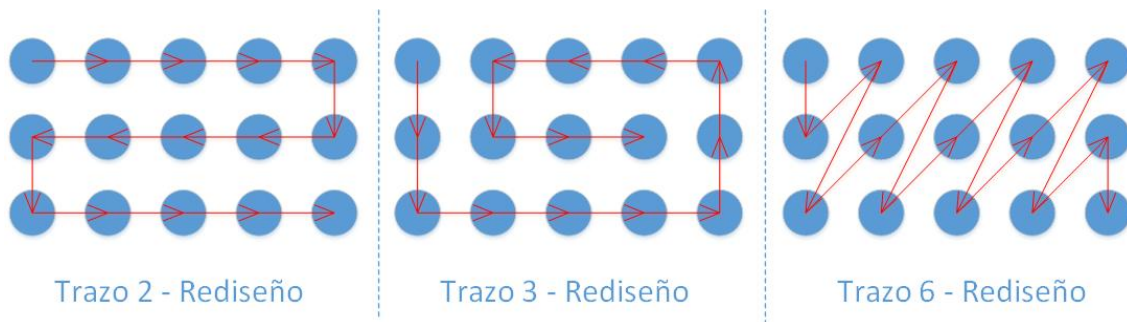


Figura 5.2. Rediseño de algunos de los trazos

De esta forma, el trazo número 2 se verá sustituido por un trazo en espiral similar al número 1, pero ejecutado según la dirección longitudinal del antebrazo. El trazo número tres, por su parte, se verá sustituido por un diseño en espiral partiendo del motor A1 hasta el motor D2. Además, el patrón descrito por el trazo 6 se ha alterado al considerarse demasiado confuso como para ser identificado correctamente por los participantes y será sustituido por una versión simplificada del mismo, con múltiples trazos en diagonal.

Con respecto al resto de trazos, se ha adecuado la velocidad de ejecución de los números 1 y 4 para ajustarse a las sugerencias de los primeros sujetos de prueba, que indicaron que estas debían ser más rápidas para generar una sensación de continuidad en el movimiento.

Letras por vía háptica		
Letra	Registrado	Recordado
 A		
 B		
 O		
 X		
 Q		

Figura 5.3. Formulario de pruebas cumplimentado para Braille

En las pruebas del modo Braille, los resultados han probado que las letras formadas por hasta 3 puntos se identifican correctamente en prácticamente la totalidad de los experimentos, mientras que a partir de 3 puntos los patrones resultan demasiado complicados y el porcentaje de identificación correcta es mínimo (en torno al 15% de las experiencias fueron exitosas).

Esto se achaca a la combinación de dos factores: Al haber tantos motores vibrando simultáneamente, la vibración se transmite al prototipo, por lo que resulta imposible distinguir con claridad los puntos de origen; y al haber tantas fuentes de excitación de los mecanorreceptores, los canales de recepción de información se saturan debido a la falta de entrenamiento (un caso similar al de tratar de escuchar y comprender varias conversaciones simultáneamente).

Tras aplicárseles el patrón, se pedía a los participantes que identificasen este cuando estuvieran listos y, en caso de identificación errónea, se les indicaba el patrón correcto. Todos los patrones correctamente identificados fueron después reproducidos correctamente por los participantes, mientras que los patrones incorrectamente identificados fueron posteriormente reproducidos en aproximadamente la mitad de los casos.

Esto parece indicar que el tacto es una vía válida de envío de información a retener por el receptor, pudiendo deberse los errores en la posterior reproducción de las letras al hecho de haber recibido informaciones distintas por vía táctil y por vía visual. En cuanto a la comparativa entre la recepción de información por vía táctil y por vía visual, aún no se han reunido suficientes datos como para obtener una respuesta concluyente.

5.3. Rediseño del prototipo

Desde las primeras pruebas ha quedado patente la necesidad de un rediseño del prototipo. En primer lugar, pese a que se ha conseguido un ajuste aceptable del brazalete a la forma del antebrazo, es necesario alterar la forma de este para mejorar dicho ajuste, ya que la actual dificulta la recepción de información en algunas zonas. También será necesaria la inclusión de una forma distinta de sujetar los actuadores, ya que, si bien la actual permite un mantenimiento relativamente sencillo, el tiempo requerido para acceder a uno de ellos sin retirar el resto resulta excesivo. Además, habrá de incluirse una cobertura para el cableado del prototipo, ya que en el diseño inicial resulta sencillo dañarlo al estar demasiado expuesto.

También se ha observado que la propia vibración de los actuadores puede llegar a dañar o incluso romper las soldaduras que unen los cables de estos con el resto del cableado del prototipo, lo que obliga a realizar un mantenimiento más habitual de lo deseable. Por ello, en un posible rediseño del aparato sería necesario incluir algún tipo de sujeción interna del cableado para prevenir estos efectos.

Cara a un rediseño del prototipo, sería conveniente incluir una forma de alimentación portátil, ya sea en forma de baterías recargables o de pilas, para aumentar la autonomía del dispositivo. Así mismo, rediseñar la alimentación de los motores individuales es

necesario para evitar el efecto de pérdida de intensidad de vibración si actúan varios de la misma línea simultáneamente.

Una vez incorporada la fuente de alimentación portátil, el siguiente paso hacia un dispositivo completamente *wearable* es instalar algún tipo de comunicación inalámbrica (WiFi o Bluetooth, por ejemplo) entre el *SimTac* y el computador que lo controle.

También sería útil a la hora de experimentar y aumentar las prestaciones del aparato el diseño de una aplicación software que permita dibujar un trazo sobre un dispositivo táctil y que este sea traducido a un patrón de vibración de motores que sea enviado al *SimTac*.

Por último, experimentar con distintos tipos de actuadores sería necesario para determinar de manera fiable la forma óptima de transmitir información con el prototipo *SimTac*.

6. CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas indican que la transmisión de información por vía táctil a través de un dispositivo háptico es posible, si bien su eficiencia depende de la complejidad de la información a transmitir.

En el caso de transmitir mensajes, el lenguaje Braille podría ser clave para ello, por tratarse de una representación muy sencilla del alfabeto que, con suficiente entrenamiento, se cree (basándose en los resultados obtenidos) que podría identificarse de forma eficiente. El empleo de trazos para transmisión de mensajes parece inadecuado utilizando actuadores vibradores, ya que las pruebas han mostrado que resulta difícil identificar determinados movimientos. Además, la complejidad del algoritmo para traducir mensajes a trazos podría ralentizar la ejecución del programa, consiguiéndose movimientos más lentos en los trazos y por tanto de peor calidad.

Cuando la información que se ha de transmitir no requiere una gran precisión, por otra parte, la generación de trazos con *SimTac* podría resultar adecuada en conjunto con los canales visual y auditivo. En casos como, por ejemplo, el de un piloto al que se desea avisar cada vez que se desvíe del rumbo a tomar se podría emplear un dispositivo similar al prototipo desarrollado, ya que la información que se debe transmitir solo es en términos de “girar a la derecha” o “girar a la izquierda”, y podría permitir a este liberar los canales visual y auditivo para dedicarlos a la instrumentación de la nave.

En otros campos de aplicación, como por ejemplo la industria del ocio, dispositivos como el *SimTac* aplicados a cualquier parte del cuerpo son una tecnología en auge, por lo que también debería considerarse esta alternativa. Así, para los desarrolladores de videojuegos o películas podría resultar interesante un dispositivo háptico con estas características para generar la sensación de mayor inmersión.

7. PRESUPUESTO

A lo largo del proyecto se ha incurrido en diversos costes que se detallan a continuación. Se ha dividido estos costes en tres apartados atendiendo al motivo de su inclusión: Costes de materiales (donde se recoge el coste de los materiales necesarios para construir los dos dispositivos de pruebas que se han empleado a lo largo del proyecto), costes de mano de obra (donde se incluye el presupuesto que habría que destinar al pago de los empleados que han colaborado en el proyecto) y costes de amortización de equipos (donde se detallan los costes que ha acarreado el uso de equipos necesarios para la realización del proyecto).

7.1. Coste de materiales

En el coste de los materiales se ha incluido el total de los materiales adquiridos, no solo el que se refleja en el prototipo final, ya que muchos de los materiales sobrantes se han empleado como recambios en labores de mantenimiento (por ejemplo, aunque de los 50 motores adquiridos solo aparezcan 15 en el prototipo, en torno a una docena de ellos han resultado dañados durante las pruebas, lo que ha obligado a sustituirlos).

Tabla 7.1. Coste de materiales textiles

MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		PLATAFORMA ELECTRÓNICA INALÁMBRICA TIPO “WEARABLE” Y ENSAYOS DE ESTA CON POBLACIÓN				Pag 1 COSTE DE MATERIALES TEXTILES
Nº ORDEN	CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	Nº UNIDADES	FABRICANTE	PRECIO UNITARIO MATERIAL	TOTAL
1.1	Goma eva	Turquesa 026	1	-	3,4	3,4
1.2	Lycra	Lycra mate ACQUA 027	1	-	8,7	8,7
1.3	Velcro	Blanco	1	-	1,25	1,25
1.4	Bies	Turquesa 026	1	-	0,55	0,55
1.5	Goma elástica (costura)	-	1	-	2,9	2,9
1.6	Goma elástica	00 04 54 50	5	Fixo	0,007	0,035
1.7	Hilo	-	1	-	8	8
COSTE TOTAL DE MATERIALES						24,84

Tabla 7.2. Coste de materiales eléctricos

MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		PLATAFORMA ELECTRÓNICA INALÁMBRICA TIPO “WEARABLE” Y ENSAYOS DE ESTA CON POBLACIÓN				Pag 2 COSTE DE MATERIALES ELÉCTRICOS
Nº ORDEN	CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	Nº UNIDADES	FABRICANTE	PRECIO UNITARIO MATERIAL	TOTAL
2.1	Motores vibradores	310-103	50	Precision Microdrives	5,01	248,5
2.2	Arduino Mega 2560	-	1	Arduino	33,45	33,45
2.3	Cable trenzado	Q2-412	1	Emelec Viascom	3	3
2.4	Regletas (3 conectores)	KRESS3	15	-	0,42	6,3
2.5	Regletas (2 conectores)	KRESS2	5	-	0,25	1,25
2.6	Transistor BC547B	BC547BG	15	ON Semiconductor	0,17	2,55
2.7	Diodo 1N4007	1N4007-E3/54	15	Vishay	0,051	0,765
2.8	Estaño	-	1	-	1	1
2.9	PIC16F887	PIC16F887	1	Microchip	2,78	2,78
2.10	Pulsadores	-	7	-	0,15	1,05
2.11	Diodos LED	L-53GD	4	Kingbright	0,096	0,384
2.12	Condensadores	711-1396	2	-	0,018	0,036
2.13	Resistencias	707-7745	5	-	0,015	0,075
COSTE TOTAL DE MATERIALES						301,14

7.2. Coste de amortización del equipo

En este apartado se ha considerado en cada caso el coeficiente de amortización, es decir, el porcentaje de vida del dispositivo o licencia empleado durante el proyecto, calculado según la expresión:

$$\text{Coeficiente de amortización} = \text{Tiempo de empleo} / \text{Duración del recurso}$$

Como tiempo de empleo, se ha considerado una duración para el proyecto de 6 meses (Febrero-Julio 2015).

Tabla 7.3. Coste de amortización del equipo

MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		PLATAFORMA ELECTRÓNICA INALÁMBRICA TIPO “WEARABLE” Y ENSAYOS DE ESTA CON POBLACIÓN			Pag 3 COSTE DE AMORTIZACIÓN DEL EQUIPO	
Nº ORDEN	CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	FABRICANTE	PRECIO(€)	COEFICIENTE DE AMORTIZACIÓN	TOTAL
3.1	Hardware	Ordenador Portátil	Samsung	600	0,07	42
3.2	Software	Matlab R2013b	MathWorks	6.000	0,08	480
3.3	Software	Arduino	Arduino	-	-	0
3.4	Software	MPLab	Microchip	-	-	0
3.5	Software	CCS Compiler	CCS, Inc.	316,57	0,1	31,66
3.6	Software	SolidWorks 2014	SolidWorks Corp	6.500	0,05	325
3.7	Software	Office Profesional 2010	Microsoft	539	0,07	37,73
COSTE TOTAL DE AMORTIZACIÓN DEL EQUIPO						916,39

7.3. Coste de la mano de obra

En este apartado se han contabilizado las horas dedicadas a cada una de las tareas del proyecto y se ha calculado el coste asociado a la mano de obra necesaria para llevarlas a cabo.

Tabla 7.4. Coste de mano de obra para pruebas y organización

MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		PLATAFORMA ELECTRÓNICA INALÁMBRICA TIPO “WEARABLE” Y ENSAYOS DE ESTA CON POBLACIÓN		Pag 4 COSTE DE MANO DE OBRA DE PRUEBAS Y ORGANIZACIÓN	
Organización del Proyecto					
Nº ORDEN	CONCEPTO		PRECIO(€/h)	HORAS	TOTAL
4.1	Recopilación de información		10	60	600
4.2	Planificación		10	25	250
4.3	Documentación		10	160	1600
Pruebas realizadas					
4.4	Pruebas del primer prototipo		10	20	200
4.5	Pruebas del prototipo final		10	40	400
4.6	Simulación de los modelos		10	30	300
Coste Total de Mano de Obra					3350

Tabla 7.5. Coste de mano de obra para diseño y fabricación

MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		PLATAFORMA ELECTRÓNICA INALÁMBRICA TIPO “WEARABLE” Y ENSAYOS DE ESTA CON POBLACIÓN		Pag 5 COSTE DE MANO DE OBRA PARA DISEÑO Y FABRICACIÓN	
Diseño Mecánico y Fabricación					
Nº ORDEN	CONCEPTO	PRECIO(€/h)	HORAS	TOTAL	
5.1	Diseño	10	40	400	
5.2	Modelado 3D	10	10	100	
5.3	Fabricación y Montaje	10	20	200	
Diseño Electrónico y Fabricación					
Nº ORDEN	CONCEPTOS	PRECIO(€/h)	HORAS	TOTAL	
5.4	Diseño	10	5	50	
5.5	Modelado	10	5	50	
5.6	Fabricación y Montaje	10	15	150	
Diseño de Software					
5.7	Diseño de modelos de Simulink	10	150	1500	
5.8	Diseño del interfaz gráfico	10	100	1000	
5.9	Diseño del software del primer prototipo	10	15	150	
Coste Total de Mano de Obra				3600	

7.4. Presupuesto total del proyecto

Una vez calculados los costes por separado, se suman todos y se aplican los porcentajes de IVA y Beneficio Industrial para obtener el presupuesto completo del proyecto.

Tabla 7.6. Presupuesto total del proyecto

MÁSTER DE INGENIERÍA MECATRÓNICA	PLATAFORMA ELECTRÓNICA INALÁMBRICA TIPO “WEARABLE” Y ENSAYOS DE ESTA CON POBLACIÓN	Pag 4 COSTE TOTAL
CONCEPTO		TOTAL
Coste de Materiales		325,98
Coste de Amortización de Equipos		916,39
Coste de Mano de Obra		6950
Coste Total de Ejecución del Proyecto		8192,37
Beneficio Industrial (10 %)		819,24
IVA (21 %)		1892,44
COSTE TOTAL		10904,04

El presupuesto total es de:

DIEZ MIL NOVECIENTOS CUATRO CON CUATRO

8. **BIBLIOGRAFÍA**

8.1. **Libros**

- [1] Mark F. Bear, Barry W. Connors, Michael A. Paradiso. *Neurociencia. Explorando el cerebro*. Barcelona: MASSON-Williams & Wilkins España S.A., 1998. ISBN 84-8315-012-3. Capítulos 4. Potencial de Acción y 12. Sistema Sensorial Somático.
- [2] John G. Webster (Editor). *Medical Instrumentation. Application and Design. Third edition*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1998. ISBN 0-471-15368-0. Capítulo 14. Electrical Safety. Walter H. Olson.

8.2. **Artículos**

- [3] Ali Israr and Ivan Poupyrev. *Tactile brush: Drawing on Skin with a Tactile Grid Display*. Disney Research, Pittsburg.
- [4] Thierry Keller and Andreas Kuhn. *Electrodes for transcutaneous (surface) electrical stimulation*.
- [5] Ali Israr, Ivan Poupyrev, Chris Ioffreda, Jim Cox, Nathan Gouveia, Huw Bowles, Anastasios Brakis, Baylor Knight, Kenny Mitchell, Tom Williams. *Surround Haptics: Sendinc Shivers Down Your Spine*.
- [6] Ali Israr, Ivan Poupyrev. *Control Space of Apparent Haptic Motion*. Disney Research, Pittsburg.
- [7] Robert W. Lindeman, John L. Sibert, Erick Mendez-Mendez, Sachin Patil, Daniel Phifer. *Effectiveness of directional vibrotactile cuing on a building-clearing task*. Department of Computer Science, George Washington University.
- [8] Attila Kis. *Tactile Sensing and Analogic Algorithms*.
- [9] Lilly Spirkovska. *Summary of Tactile User Interfaces Techniques and Systems*. NASA Ames Research Center.
- [10] Yasuyuki Yanagida, Mitsuhiro Kakita, Robert W. Lindeman, Yuichiro Kume and Nobuji Tetsutani. *Vibrotactile Letter Reading Using a Low-Resolution Tactor Array*. Media Information Science Laboratories (Kyoto, Japan), School of Knowledge Science (Ishikawa, Japan), Department of Computer Science (George Town University, USA), Faculty of Engineering (Kanagawa, Japan).
- [11] Y. Mizukami and H. Sawada. *Tactile information transmission by apparent movement phenomenon using shape-memory alloy device*. Department of Intelligent Mechanical Systems Engineering, Kanagawa University.
- [12] Jun Oohara, Hiroshi Kato, Yuki Hashimoto and Hiroyuki Kajimoto. *Presentation of Positional Information by Heat Phantom Sensation*. The University of Electro-Communications, Japan Science and Technology Agency.
- [13] Lilly Spirkovska. *Summary of Tactile User Interfaces Techniques and Systems*. NASA Ames Research Center.
- [14] Masazaku Ide and Souta Hidaka. *Tactile stimulation can suppress visual perception*.
- [15] S. Mad Saad, F. Razaly, M. Z. Md Zain, M. Hussein, M. S. Yaacob, A. R. Musa, M. Y. Abdullah. *Application for PIC Microcontroller for Controlling*

Piezoelectric Braille Cell. Department of Applied Mechanics, Universiti Teknologi Malaysia.

- [16] Pruittikorn Smithmaitrie. *Analysis and Design of Piezoelectric Braille Display*. Department of Mechanical Engineering, Prince of Songkla University, Thailand.
- [17] Jun Su Lee and Stepan Lucyszyn. *A Micromachined Refreshable Braille Cell*. IEEE.

8.3. Páginas web

8.3.1. Hardware

- [18] <http://spain.ni.com/>
- [19] <http://www.korfx.com/start>
- [20] <https://puredata.info/>
- [21] <http://www.eaiinfo.com/>
- [22] <http://www.arduino.cc/>

8.3.2. Software

- [23] <http://es.mathworks.com/>
- [24] <http://aflrovvs.blogspot.com.es/>
- [25] <http://blogs.mathworks.com/>
- [26] <https://nf.nci.org.au/facilities/software/Matlab/techdoc/>